MEDIO SIGLO DE DOBLE HELICE: ENTREVISTA A WATSON

INVESTIGACION y CIENCIA

MARZO 2003
5,50 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

EL PROYECTO NANODRIVE

INTERACCIONES SISMICAS

PIGMENTOS CONTRA EL CANCER

EL CRANEO DE TOUMAI

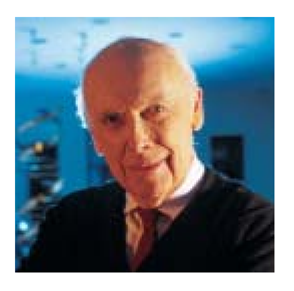
ESTRUCTURA Y ESTABILIDAD DE LAS PROTEINAS



INVESTIGACION y CIENCIA

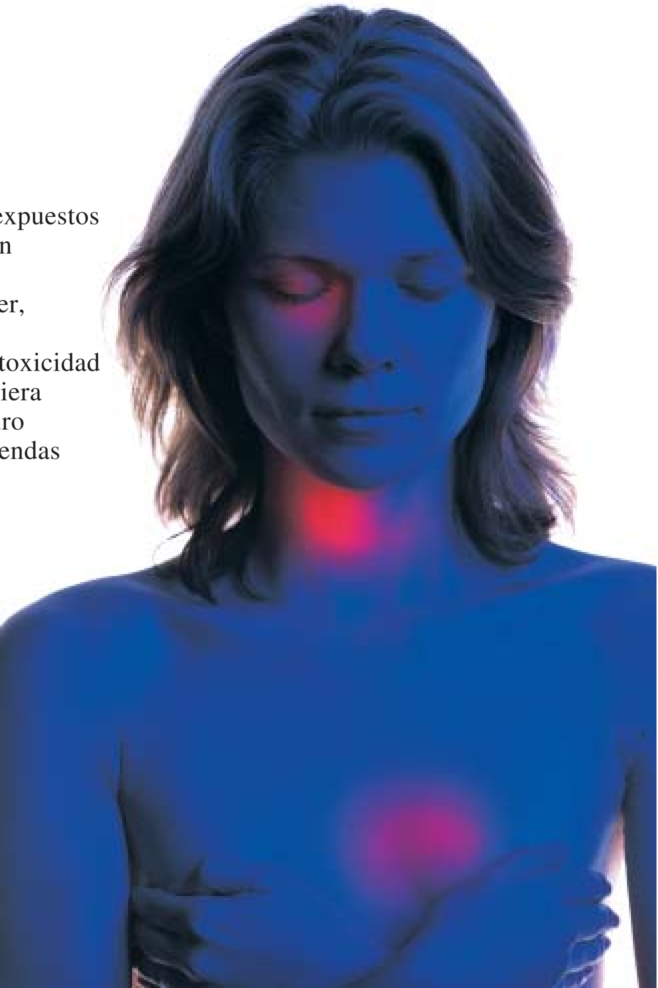
Marzo de 2003 Número 318

SECCIONES









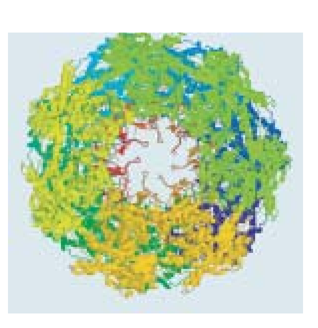








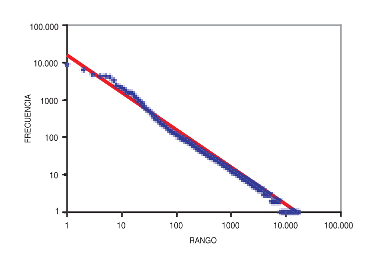






SECCIONES




100.000
10.000
1000
100
10
1
FRECUENCIA
1
10
100
1000
10.000
100.000
RANGO





DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
REVIEWS EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Steve Mirsky y George Musser
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18
(Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 914 843 900

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Teléfono 934 143 344

PUBLICIDAD

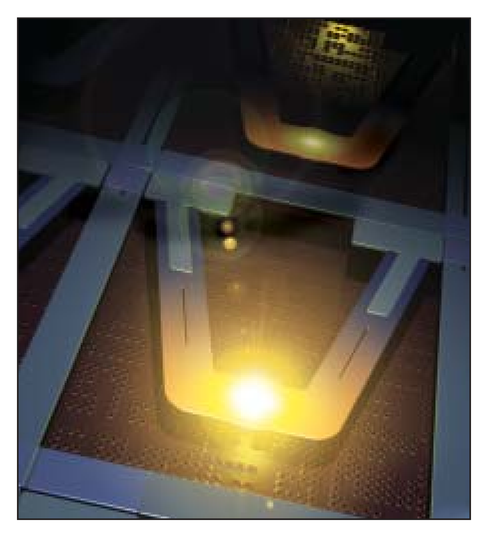
GM Publicidad
Edificio Eurobuilding
Juan Ramón Jiménez, 8, 1.ª planta
28036 Madrid
Tel. 912 776 400
Fax 914 097 046

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Luis Bou: *Porfirinas* y *Aventuras problemáticas*; Manuel Puigcerver: *El Artico eurasiático durante el último período glacial* y *Concatenaciones sísmicas*; Juan P. Adrados: *Nanounidades de memoria*; Carlos Lorenzo: *El más antiguo de los homínidos*; J. Vilardell: *Ciencia del champán, Hace..., Curiosidades de la física* e *Ideas aplicadas*; Angel Garcimartín: *Entrevista*



Portada: Slim Films

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 914 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	60,00 euro	110,00 euro
Extranjero	85,00 euro	160,00 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 5,50 euro
Extraordinario: 6,00 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

ESCASEZ DE NITRÓGENO. “La paradoja de que escasee el nitrógeno cuando tanto abunda exaspera a la humanidad. El alimento de todo lo viviente en este planeta, animal o vegetal, debe contener nitrógeno. No obstante, cuesta tanto incorporar el nitrógeno libre del aire a los productos alimenticios, que el hombre ha de acometer unas fatigosísimas faenas para conservar las no muy grandes cantidades que la naturaleza capta y fija en el suelo. Pero desde 1949, un alud de descubrimientos ha sacado a luz una insospechada cantidad de microorganismos que fijan el nitrógeno. Podemos ilusionarnos con la posibilidad de que acaso algún día seamos capaces de aprovechar la potencia de esos organismos para ayudar al ciclo del nitrógeno natural a enriquecer nuestras tierras.”

UNA VÍA LÁCTEA NO CAPRICHOSA. “Según Harlow Shapley, del Observatorio del Colegio de Harvard, puede que el universo sea dos veces mayor, y dos veces más viejo, que lo hasta ahora supuesto por los astrónomos. Si todas las galaxias estuvieran el doble de lejos que lo que habíamos pensado, también deberían ser el doble de grandes. En consecuencia, la Vía Láctea, una galaxia que se presume excepcionalmente extensa, tendría más o menos el mismo tamaño que la nebulosa de Andrómeda y muchas otras galaxias. Esto alivia a los astrónomos, quienes habían sido incapaces de dar con una razón de que nuestra galaxia fuera un gigante monstruoso. La nueva estimación despejaría otra discrepancia. Se admitía antes que el universo rondaba los dos mil millones de años de edad, mientras que las pruebas geológicas indican que la Tierra rebasa los tres mil millones de años. La estimación revisada del tamaño del universo dobla la edad de éste hasta los cuatro mil millones de años.”

...cien años

BIENVENIDO TODO EL MUNDO. “Durante el año pasado desembarcaron en el puerto de Nueva York 139.848 pasajeros de primera clase, más la enorme cifra de 574.276 pasajeros de tercera clase. ¡Imagínense! Este país absorbe más de medio millón de extranjeros, en su mayoría de los pueblos más pobres e ignorantes de Europa, con tal facilidad y naturalidad que no causa impresión visible en nuestras rutinas cotidianas. Tan fácil asimilación de tan heterogéneos millones se debe a nuestro magnífico sistema de escuelas públicas, sin duda el principal medio para convertir a los hijos de los inmigrantes, ya nativos por su nacimiento, en nativos también por sus cualidades y preparación.”

PELIGROS FERROVIARIOS. “Los dispositivos de seguridad y los aparatos automáticos que adopta el ferrocarril aminoran el riesgo de accidentes, pero el caballo de hierro nunca puede separarse del todo de las falibles manos humanas. Con sus caras húmedas y cuerpos sudorosos, hora tras hora vigilantes, maravilla que los conductores de esos corceles de acero cometan tan pocos errores. Mostramos un accidente en Belfast (Irlanda). En un día traicionero, un tren atravesó el muro de la cochera.”



La tecnología ferroviaria en pos de la seguridad, 1903

...ciento cincuenta años

EL AIRE DE LA LUNA. “Recientemente, M. Decuppis, selenólogo de Roma, ha llegado a la conclusión de que la Luna tiene atmósfera, aunque muy modesta, con una altura de sólo unos cuatrocientos metros, unas doscientas veces menos que la altura de la atmósfera terrestre. Hay quien cree que esa atmósfera somera podría asemejarse a la que tuvo nuestro planeta en el curso de su formación, cuando estaba compuesta principalmente de ácido carbónico gaseoso y las especies de animales que aquí vivían poseían unos órganos espacialmente adaptados para vivir en ella.”

FRAUDE PORCINO. “La adulteración de la cochevira americana se explica fácilmente: en el oeste, muchos de los cerdos se rinden a la fatiga durante su viaje en piaras hacia los mercados del este y deben ser sacrificados sobre el terreno. La única manera de aprovechar económicamente sus cadáveres es someterlos a la acción de una prensa que los convierte en una sustancia que se vende como manteca, la cual, al no haber sido fundida, contiene necesariamente grandes cantidades de materias extrañas.”

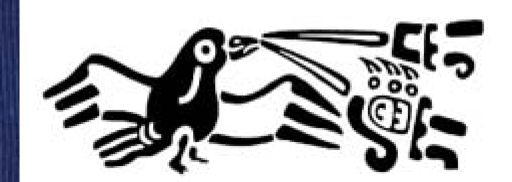
Apuntes

ANTROPOLOGIA

La escritura de los olmecas

Se han descubierto hace poco un sello y fragmentos de una placa que portan extrañas inscripciones. Quizá constituyan una muestra del primer lenguaje escrito del Nuevo Mundo. Han aparecido en Tabasco. Pertenecieron a los olmecas y se remontan al 650 a. de C. En el sello cilíndrico se representa un pájaro con símbolos que le salen del pico. La imagen induce a pensar que esas inscripciones podían vocalizarse. Los descubridores creen que significan "Rey Ajaw 3": con "ajaw 3" los olmecas se referían tanto a una fecha del calendario sagrado de 260 días como a un rey nacido en ella. La escritura precede en 250 años a otras escrituras mesoamericanas, entre ellas la de los mayas. De acuerdo con otra interpretación, sin embargo, los símbolos quizá no sean más que dibujos y no representen el habla.

—*Philip Yam*



Indicio de escritura: Este sello olmeca lleva grabado un pájaro que, al parecer, dice: "Rey Ajaw 3"



ETOLOGIA

Los perros nos entienden mejor

Si un primate mira a alguna parte, otro podrá seguirle la mirada y fijar la suya en ese mismo punto. Un chimpancé seguirá incluso la de un ser humano. Pero si se oculta un objeto en uno de dos recipientes, el chimpancé no entenderá que una mirada dirigida a un recipiente, o que se le dé un golpecito, indica que es el que guarda la prenda; a lo sumo, aprenderá tras muchos ensayos. Los perros, en cambio, sí lo entienden, a la primera. Comprenden incluso cuando un ser humano coloca algún tipo de señal sobre el recipiente correcto, o cuando se desplaza hacia el contenedor equivocado pero sin dejar de mirar el correcto. Los lobos no son capaces de tanto; sí lo será, en cambio, un cachorro de perro doméstico que ni siquiera haya tenido mucho contacto con las personas. Sin embargo, en tareas que no sean sociales, lobos y perros no se portan de manera diferente. Un grupo de antropólogos de Harvard, el Instituto Max Plank y el santuario de lobos de Ipswich deducen de todo ello que, durante la domesticación prehistórica, se fue escogiendo a los perros que mostraban unas habilidades sociocognitivas que les permitían comunicarse mejor con las personas.

BIOLOGIA

Reevolución

Gracias al parecido a que se refiere su nombre, los insectos palo escapan de la atención de los depredadores. Un análisis genético, de los que se emplean para determinar linajes evolutivos, ha descubierto que ocultaban algo más: se trata de una especie alada que evolucionó a partir de ancestros ápteros, los cuales, a su vez, derivaron de criaturas con alas. "Que sepamos, es el primer ejemplo de un componente corporal complejo que se haya perdido en un linaje evolutivo y luego se haya recuperado", escriben Michael F. Whiting, de la Universidad Brigham Young, y sus compañeros en *Nature*. Señalan más adelante que las nuevas alas no volvieron a adquirirse desde la nada; las instrucciones genéticas debieron de permanecer latentes durante al menos 50 millones de años, hasta que llegó un momento en que se primó el vuelo antes que la fecundidad (los insectos sin alas suelen poner más huevos).

—*Steve Mirsky*



Los insectos palo perdieron y recuperaron las alas

CHRISTOPHER VON NAGY (*arriba*); ALLISON WHITING *Brigham Young University* (*abajo*)

ASTRONOMIA: LOS INSTRUMENTOS

Proyectos quemados

El Estudio Digital Sloan de los Cielos consiste en la observación sistemática con un telescopio óptico —el de 3,5 metros en Point Apache, Nuevo México— de una fracción considerable del cielo boreal para la determinación de la posición y color de unos cien millones de objetos celestes. Hasta ahora se lleva concluida la mitad de la tarea. Este año iba a empezar un proyecto similar en el hemisferio austral, el Estudio Stromlo de los Cielos del Sur. Pero un incendio forestal destruyó el 18 de enero el telescopio encargado de ello, el Gran Telescopio de Melbourne, de 1,27 m, un instrumento histórico construido en 1868 —por entonces el mayor del mundo con montaje ecuatorial—. Lo trasladaron al observatorio del monte Stromlo, a mediados del siglo XX y lo remozaron por completo en 1991; con él se llevo a cabo el proyecto MACHO, destinado a investigar las estrellas oscuras así denominadas. Se ha perdido también un espectrógrafo, casi acabado ya, que iba a instalarse en el telescopio Géminis Norte, de 8,1 metros, en Mauna Kea. El equipo encargado del Estudio se propone encontrar otro telescopio con el que pueda sacarlo adelante.



Así quedó el gran telescopio de Melbourne, tras el incendio del observatorio del monte Stromlo

ASTRONOMIA: LA COSMOLOGIA

El nuevo cuásar más lejano

Hasta ahora se conocían cuatro cuásares con un desplazamiento al rojo cercano o mayor que 6. Cuanto mayor sea esta magnitud más próximo al origen del universo estará el momento en que se emitió la luz que recibimos. El más lejano de esos cuatro cuásares tiene un desplazamiento de 6,28. Ahora, un equipo encabezado por Xiaohui Fan ha hallado, gracias a las imágenes en longitudes de onda visibles del Estudio Sloan de los Cielos, tres cuásares más con desplazamientos al rojo mayores de 6. Uno de ellos, con un desplazamiento de 6,42, es el cuásar más lejano que se conoce. Nació cuando el universo debía de tener unos 800 millones de años.

ASTRONOMIA: LA GALAXIA

Un anillo de estrellas

El Estudio Digital Sloan de los Cielos ha descubierto un arco de estrellas alrededor de la Vía Láctea, a 60.000 años-luz de su centro, dos veces más lejos que el Sol. Quizá sea una parte de un anillo completo de 500 millones de estrellas. Lo mantiene allí la fuerza de la gravedad, sobre todo de la invisible materia oscura que se cree rodea a la galaxia. Podría contribuir a que se cartografiase esa materia de naturaleza aún desconocida. Según la interpretación de dos de los descubridores, Brian Yanni y Heidi Jo Newberg, el hallazgo respalda que la Vía Láctea se creó gracias a la fusión de muchas galaxias pequeñas. El anillo, en concreto, sería el residuo del impacto con una galaxia enana hará miles de millones de años.

—George Musser



Un anillo de estrellas rodea la Vía Láctea

MATTHEW COLLESS, *Australian National University* (*arriba*); RON MILLER (*abajo*)

FE DE ERRATA: Un duende de imprenta desbarató la atribución de la imagen que publicamos en noviembre del cuásar por entonces más lejano: la correcta es: Donald Schneider y Xiaohui Fan, Colaboración SDSS; Brandt *et al* consiste en una imagen en falso color de la posterior observación en rayos X del mismo cuásar.

Porfirinas

Pigmentos que, expuestos a la luz, se tornan cáusticos pueden combatir el cáncer, la ceguera y las cardiopatías. Su toxicidad fotoinducida pudiera explicar el obscuro origen de las leyendas de vampiros

Nick Lane

El mundo del vampiro suele asociarse a la novela de Bram Stoker y al personaje cinematográfico que encarnó Bela Lugosi: un ser marginado, romántico, de intenso y morboso atractivo sexual, succionador de sangre; un ser que aborrece los ajos y las cruces; sobre quien la luz del sol tiene efectos fatales. En las leyendas populares, cuyo origen se pierde en la noche de los tiempos, los vampiros eran seres patéticos, lamentables, sepultos vivos. Ciertos investigadores, queriendo hallar alguna verdad subyacente en las leyendas de vampirismo, han especulado que tales historias pudieron haber estado inspiradas en personas de carne y hueso que sufrían de porfiria, una rara enfermedad de la sangre. Y los científicos, al buscar tratamientos para este mal, se han topado con nuevas vías de tratamiento de otras graves enfermedades, mucho más frecuentes.

La porfiria constituye, en realidad, un grupo heterogéneo de trastornos afines, en los cuales ciertos pigmentos, denominados porfirinas, se acumulan en la piel, los huesos, y los dientes. Muchas porfirinas son benignas en la oscuridad; en cambio, la luz del sol las transforma en toxinas cáusticas, que, por así decirlo, devoran las carnes. Sin el debido tratamiento, las formas más severas de la enfermedad (como la porfiria eritropoyética congénita) pueden provocar mutilaciones grotescas, causando en sus fases terminales esa clase de horripilante desfiguración que sería de esperar en los sepultos no acabados de morir. Las orejas y la nariz aparecen carcomidas. Los labios y las encías, roídos y descarnados, dejan al descubierto unos dientes de color rojo ladrillo, largos como colmillos. La piel queda cubierta de ampollas y lesiones, que confeccionan un centón de tejidos cicatriciales, con zonas de pigmentación intensa y otras de palidez mortal, que es reflejo de una anemia subyacente. Dado que la anemia puede ser tratada con transfusiones de sangre, historiadores hay que especulen que, en eras tenebrosas, los enfermos de porfiria hubieran podido buscar remedio a su mal bebiendo sangre por conseja popular. Y haya, o no, algo de verdad en ello, es seguro que quienes padecieran la porfiria eritropoyética congénita habrían

1. FARMACOS FOTOACTIVADOS de uso en terapia fotodinámica podrían indicarse para enfermedades oftálmicas, cánceres de esófago y alteraciones coronarias.

SAM OGDEN



aprendido a no aventurarse a salir al exterior durante el día. Es posible también que evitaran los ajos, pues, según se cree, algunas de las sustancias que éstos contienen exacerban los síntomas de la enfermedad porfírica, convirtiendo un ataque leve en una reacción horrorosa.

Mientras se esforzaban en hallar remedios para la porfiria, los científicos cayeron en la cuenta de que las porfirinas podrían no constituir solamente un problema, sino convertirse también en aliadas de la medicina. Si se inyecta porfirina en un tejido enfermo —en un tumor canceroso, por ejemplo—, la porfirina puede ser activada mediante luz al objeto de destruir ese tejido. El procedimiento se denomina terapia fotodinámica (TFD); se ha desarrollado tanto, que ha pasado de ser en los años setenta un tratamiento poco verosímil contra el cáncer a erigirse ahora en un arma perfeccionada y eficaz contra todo un abanico de trastornos, en particular para tratar la degeneración macular y la miopía patológica, dos causas corrientes de ceguera en los adultos. Entre las investigaciones en curso se encuentran posibles tratamientos para la enfermedad de las arterias coronarias, sida, trastornos autoinmunitarios, rechazo de transplantes y leucemia.

Mecanismos moleculares

Las sustancias que desempeñan un papel crucial en la porfiria y en la terapia fotodinámica, se cuentan entre las más antiguas e importantes de las moléculas biológicas. Orquestan los dos procesos críticos de generación de energía en los seres vivos: la fotosíntesis y la respiración aeróbica. Las porfirinas constituyen una familia notable de compuestos íntimamente relacionados, un curioso y colorido sistema de variaciones evolutivas sobre un mismo tema. Todas las porfirinas comparten un anillo tetrapirrólico plano (compuesto por carbono y nitrógeno) con un hueco central adecuado para que un ion metálico, de hierro o de magnesio, se aloje en él. Estos átomos metálicos, cuando están correctamente alineados en la férula de los anillos de porfirina, catalizan los procesos de generación de energía fundamentales en biología. La clorofila, el pigmento vegetal que absorbe la energía de la luz solar en la fotosíntesis, es una porfirina, como lo es el hemo, pieza clave de la molécula encargada del transporte de oxígeno —la hemoglobina— y de muchas enzimas cruciales para la vida, entre ellas, la citocromo-oxidasa (que, en una etapa crítica de la respiración celular, genera energía por transferencia de electrones al oxígeno).

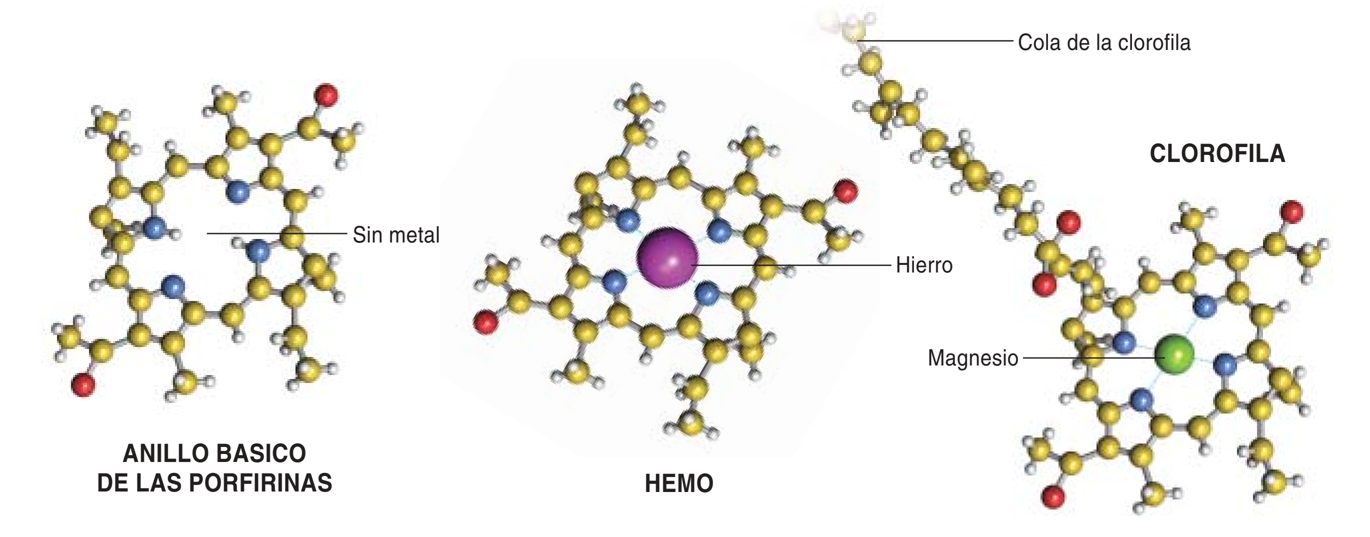
La porfiria resulta de una alteración del mecanismo productor de hemo en el organismo. Nuestro cuerpo sintetiza hemo y otras porfirinas en una serie de ocho estadios coordinados, catalizados cada uno por una enzima distinta. Al final, se aporta hierro para formar hemo. En la porfiria, se omite uno de los pasos, lo que produce un exceso de los compuestos intermedios generados en etapas anteriores de la secuencia. Nuestro organismo no ha evolucionado para eliminar tales metabolitos intermedios, por lo que, a menudo, los acumula en la piel. Estas sustancias intermedias no lesionan la piel directamente, pero muchas sí lo hacen por vía indirecta. Las porfirinas no metálicas (así como las metalo-porfirinas que contienen metales que no interaccionan con el anillo porfirínico) pueden resultar excitadas al recibir luz de ciertas longitudes de onda, saltando sus electrones a orbitales más energéticos. Estas moléculas pueden, entonces, transmitir su excitación a otras moléculas que posean enlaces de tipos adecuados, el oxígeno en particular, para producir oxígeno monoatómico y radicales libres, aquél y éstas muy reactivos. Dicho con otras palabras, las porfirinas no metálicas no son las agentes, sino las mediadoras de la destrucción: catalizan la síntesis de formas tóxicas del oxígeno.

Las reacciones fotosensibles no son necesariamente perniciosas. Sus efectos benéficos se conocen desde la antigüedad. En particular, algunos frutos y semillas contienen psoralenos, compuestos fotosensibles (fotosensibilizadores) que, indirectamente, llevaron a la experimentación con porfirinas. Los psoralenos se utilizaban, hace miles de años, en Egipto y en la India para el tratamiento de enfermedades de la piel. A mediados del siglo pasado los incorporó a la medicina moderna Abdel Monem El Mofty, dermatólogo de la Universidad de El Cairo; empezó a tratar a enfermos de vitíligo (trastorno que provoca la despigmentación de la piel en manchas irregulares), y más tarde, a los enfermos de psoriasis, valiéndose de psoralenos purificados y de luz. Al ser activados por la luz, los psoralenos reaccionan con el ADN de las células en proliferación, matándolas.

Aaron B. Lerner, de la Universidad de Yale, y Thomas B. Fitzpatrick, de la Universidad de Harvard, quedaron impresionados por la potencia de los psoralenos. En la década de los sesenta demostraron que los psoralenos se activaban con radiación ultravioleta (UVA); posteriormente, la terapia de psoralenos fue perfeccionada utilizando una lámpara ultravioleta parecida a la que hoy se emplea en los solarios. Su método fue conocido por la sigla PUVA (abreviatura de psoralenos con UVA) y es en la actualidad uno de los tratamientos más eficaces para la psoriasis y otras enfermedades de la piel.

Resumen/*Fototerapia*

- En la terapia fotodinámica se utilizan porfirinas, moléculas susceptibles de activación por luz, para destruir tejidos y células de crecimiento rápido. El tratamiento podría aplicarse a una variedad de trastornos, entre ellos, la degeneración macular asociada a la edad, los tumores y las placas ateroscleróticas.
- Están comercializados unos cuantos fármacos porfíricos. Varios más se hallan en fase de experimentación en humanos.
- La idea de la terapia fotodinámica nació del estudio de una rara enfermedad, la porfiria, que se caracteriza por la acumulación de porfirinas en la piel y en ciertos órganos. A menos que la enfermedad sea controlada, las víctimas del tipo más severo de porfiria pueden quedar desfiguradas, lo que ha llevado a algunos investigadores a especular que podrían haber inspirado leyendas de vampiros en tiempos pretéritos.



2. LAS PORFIRINAS tienen todas en común una estructura anular plana, compuesta por carbono y nitrógeno, y un hueco central capaz de alojar a un ion metálico. El anillo básico tetrapirrólico (*primero por la izquierda*) se vuelve cáustico por exposición a la luz, rasgo que comparten las moléculas útiles para la terapia fotodinámica. Entre los ejemplos no tóxicos se cuentan el hemo (un componente de la hemoglobina, que transporta oxígeno) y la clorofila, que, en las plantas verdes, convierte la luz en energía.

SLIM FILMS

¿Una forma de matar células cancerosas?

A comienzos del decenio de los setenta, el éxito de la PUVA dejó impresionado a Thomas J. Dougherty, del Instituto Roswell Park del Cáncer, en Buffalo. Se preguntó si una variante de ese tratamiento no podría ser eficaz contra el cáncer. Los psoralenos activados pueden matar células "descarriadas" y controlar la inflamación, pero no son, en comparación con las porfirinas, fotosintetizadores potentes. Si los psoralenos mataban células sueltas, ¿no podrían las porfirinas devorar tumores completos? Su idea supuso el inicio de la auténtica terapia fotodinámica, en cuya aplicación ciertos fotosintetizadores catalizan la producción de radicales libres de oxígeno. Se basó en trabajos anteriores, que revelaron dos propiedades de interés médico de las porfirinas, a saber: se acumulan selectivamente en las células cancerosas y son activadas por la luz roja, que penetra más profundamente en los tejidos biológicos que otras luces de longitud de onda más corta, como la luz azul o la UVA.

Dougherty inyectó una mezcla de porfirinas en el torrente sanguíneo de ratones que sufrían tumores de mama. Esperó un par de días, para que las porfirinas se acumulasen en los tumores; seguidamente, los irradió con luz roja. Su primer montaje, rudimentario, consistía en hacer pasar la luz de un viejo proyector de diapositivas a través de una transparencia roja de 35 mm. Pese a tal simplicidad, obtuvo unos resultados espectaculares. La luz activó las porfirinas depositadas en el tumor, las cuales transfirieron su energía al oxígeno de algunas células, dañando a los tejidos circundantes. En casi todos los casos, los tumores se oscurecieron y murieron tras la fototerapia. No se apreciaron signos de recidiva.

Dougherty y sus colegas publicaron sus datos en 1975, en el *Journal of the National Cancer Institute*. En los años siguientes refinaron su técnica utilizando un láser de baja potencia para enfocar luz roja sobre los tumores. Trataron por este método a más de 100 enfermos, entre ellos, a mujeres con cáncer de mama y a pacientes de cáncer de pulmón, de próstata y de piel. Los resultados fueron alentadores, con una "respuesta parcial o completa" en 111 de 113 tumores.

Pero el cáncer no se deja vencer tan fácilmente. Al ir aumentando el número de médicos que probaban suerte con TFD, se multiplicaron los inconvenientes. La afinidad de las porfirinas para con los tumores resultó tener algo de ilusoria, pues las porfirinas son incorporadas por cualquier tejido de crecimiento rápido, incluida la piel, lo que ocasiona fotosensibilidad. Aunque los primeros pacientes de Dougherty tuvieron sin duda cuidado de evitar el sol, alrededor del 40 por ciento de ellos sufrió quemaduras y sarpullidos en la piel en las semanas siguientes a la TFD.

Otra cuestión concernía a la potencia. Los primeros preparados de porfirinas eran mezclas; su potencia terapéutica rara vez bastaba para eliminar al tumor completo. Unas porfirinas no transmiten bien la energía al oxígeno, mientras que otras sólo se activan con luz que no puede penetrar en el tumor más allá de unos cuantos milímetros. Algunos pigmentos biológicos habituales de los tejidos, como la hemoglobina y la melanina, también absorben luz; al hacerlo, pueden impedir que la porfirina llegue a activarse. Incluso la propia porfirina puede provocar este problema si se acumula en concentraciones tan elevadas, que absorba toda la luz en las capas superficiales del tumor, impidiendo así la penetración hasta las más profundas.

El autor

NICK LANE, director de Adelphi Medi Cine, estudió bioquímica en el Colegio Imperial de la Universidad de Londres. Su investigación doctoral se concentró en los radicales libres y en la función metabólica en transplantes de órganos.

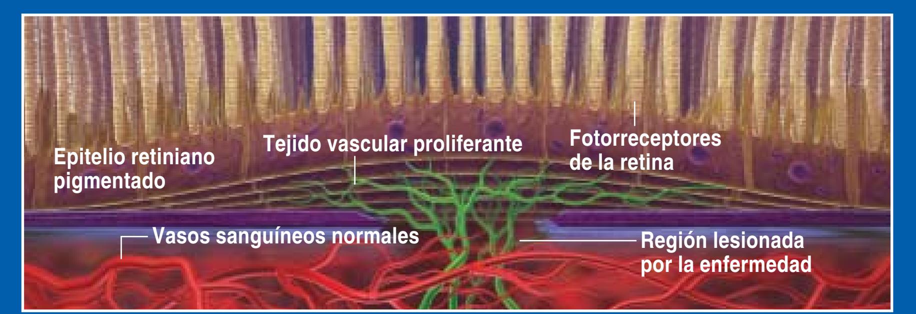
ASI ACTUA LA TERAPIA FOTODINAMICA

En la terapia fotodinámica se inyectan por vía intravenosa porfirinas. Estas sustancias fotosensibles se concentran en las células de proliferación rápida y, expuestas a la luz, inician una cascada de reacciones moleculares que pueden destruir dichas células, así como los tejidos que componen. Entre las dianas para esta terapia se cuentan los capilares anómalos de la retina de quienes padecen degeneración macular (la causa principal de ceguera en adultos), tumores y placas ateroscleróticas de las arterias coronarias.

... DOMINIO MOLECULAR



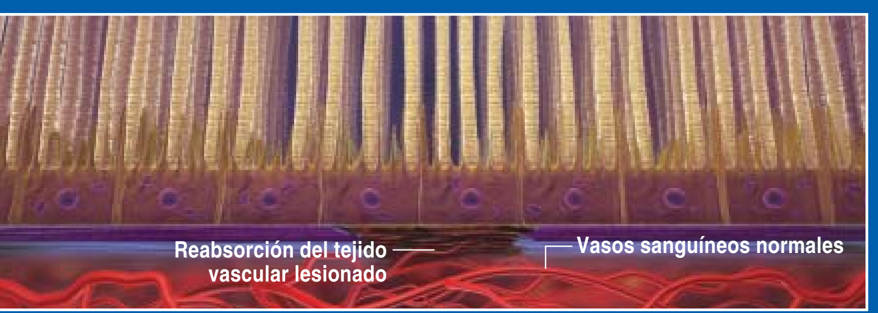
... EN EL OJO



1 Para tratar la degeneración macular, se inyecta una porfirina (*verde*) por vía intravenosa. En sólo 15 minutos, la porfirina se ha concentrado en los capilares anómalos subyacentes a la mácula, que es la región central de la retina y se encarga de percibir los colores.



2 Activación de la porfirina mediante una luz de láser rojo, con la destrucción consiguiente del tejido vascular.



3 Una vez que el tratamiento ha detenido la lesión de la retina, el tejido vascular en cuestión se reabsorbe por el organismo; los fotorreceptores suprayacentes pueden volver a su lugar. Puede haber recidivas de proliferación anómala; cabe, pues, que el enfermo haya de someterse a varias sesiones.

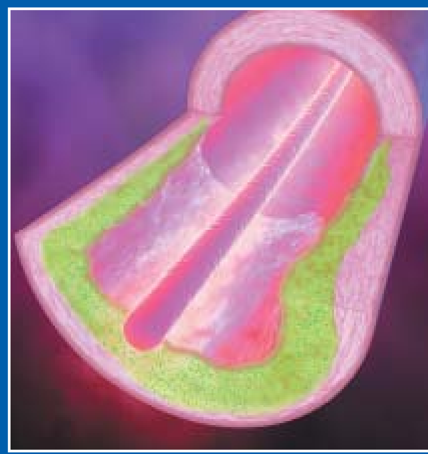
... EN EL INTERIOR DEL CUERPO

Ni siquiera la luz visible de gran longitud de onda puede adentrarse mucho en el tejido; por ello, la aplicación de terapia fotodinámica a tejidos enfermos profundos exige un sistema de iluminación en el interior.

1 En este ejemplo de tratamiento experimental se ha introducido una fibra óptica por el interior de una arteria, en la que está concentrada una porfirina en placas ateroscleróticas.



2 La fibra produce luz roja y activa la porfirina.



3 En el transcurso de algunos días, la porfirina destruye las placas indeseables.



HYBRID MEDICAL ANIMATION

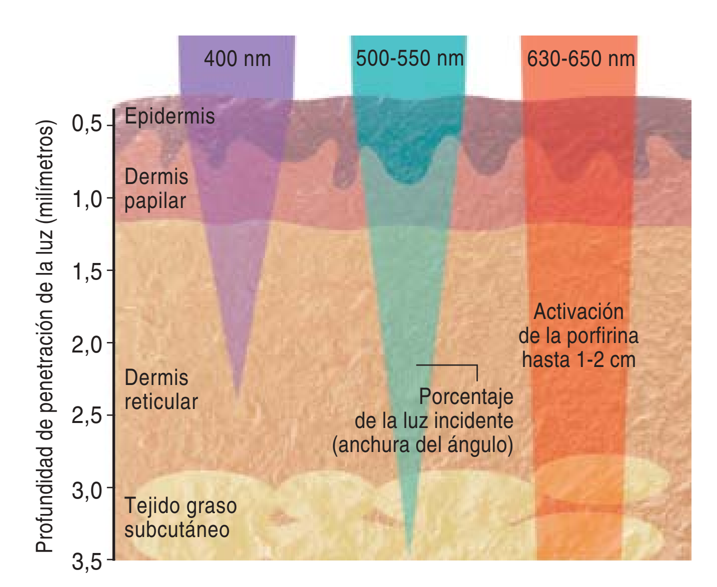
Muchas dificultades de éstas no pudieron resolverse sin el concurso de especialistas de otras disciplinas. Fueron necesarios químicos para crear porfirinas sintéticas, nuevas, de mayor selectividad respecto de los tumores y de mayor potencia, que las activaran luces cuya longitud de onda permitiera penetrar más profundamente en los tejidos y tumores. (Para cada porfirina, la absorción y la activación por luz se produce solamente a longitudes de onda determinadas, por lo que se buscan porfirinas que presenten máximos de absorción a aquellas longitudes de onda que penetran bien en tejidos biológicos.) También fue necesaria la participación de físicos para diseñar fuentes de radiación capaces de producir las luces de longitud de onda específica para activar las nuevas porfirinas, o que pudieran ser montadas en delgados endoscopios o catéteres, o incluso implantadas en tejidos. Hizo falta recurrir a farmacólogos que ideasen métodos para reducir el tiempo invertido por las porfirinas en circular a través del torrente sanguíneo, con el fin de minimizar los efectos secundarios de fotosensibilidad. Fueron precisos, por último, expertos en medicina clínica, que creasen los ensayos clínicos necesarios para demostrar un efecto y determinar los regímenes de tratamiento óptimos.

El principio activo ideal no sólo debería ser potente y selectivo hacia los tumores, sino también fragmentarse presto en componentes inocuos y excretarse del organismo. El primer preparado comercial, porfímero-sodio (Photofrin), fue aprobado por la FDA (Agencia de Fármacos y Alimentos de EE.UU.) para el tratamiento de diversos cánceres. Ha sido útil en tumores de esófago, vejiga, cabeza y cuello, en cánceres de piel y en ciertos estadios del cáncer de pulmón. Con todo, el avance no se ha producido con la celeridad esperada. No puede todavía ser tenido por parte integral de la terapéutica anticancerosa.

El primer fármaco fotosensibilizador que cumplió los más estrictos criterios de potencia y eficacia sin causar fotosensibilidad, la verteporfina (Visudyne), fue aprobado en abril de 2000 no para el tratamiento del cáncer, sino para evitar la ceguera. Conforme las teorías iban convergiendo con la realidad, los investigadores cayeron en la cuenta de que la TFD podría hacer algo más que destruir tumores.

Combatir la ceguera

Una de las cosas que podría hacer, por ejemplo, es combatir la degeneración macular asociada a la edad (DMAE), la causa más frecuente de ceguera en la población occidental, cada vez más envejecida [*véase* “Degeneración macular,” por Hui Sun y Jeremy Nathans; en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 2001]. La mayoría de quienes desarrollan degeneración macular padecen una forma benigna y no llegan a



3. LA LUZ, SEGUN SU LONGITUD DE ONDA, penetra en los tejidos hasta cierta profundidad. Por otra parte, cada porfirina absorbe luz de longitud de onda específica. Una porfirina activada por una luz que penetre más profundamente puede resultar óptima para tratar un tumor interno. En contraste con las porfirinas, los psoralenos utilizados en tratamientos PUVA son activados por luz del ultravioleta cercano (400 nanómetros), que apenas se ahonda en la piel.

perder la vista, pero alrededor de la décima parte sufren de una variante mucho más agresiva, llamada DMAE húmeda. En este caso, crecen por debajo de la retina vasos sanguíneos anormales, con derrame, similares a nodos de venas varicosas, que acaban lesionando la aguda visión central necesaria para la lectura o la conducción. Con el progreso de la enfermedad, la visión central queda obliterada, lo que hace imposible reconocer los rostros de las personas o los detalles de los objetos.

Los esfuerzos por frenar este lamentable e inexorable proceso no se han visto correspondidos. La ingesta de antioxidantes puede retrasar la instauración del trastorno, pero una vez instaurada la enfermedad, éstos tienen escaso o nulo efecto sobre su progresión. Hasta hace poco, el único tratamiento que había demostrado frenar la progresión de la DMAE húmeda era la técnica de fotocoagulación por láser. El procedimiento se basa en la aplicación de un láser térmico a los vasos sanguíneos, para cauterizarlos y así detener su crecimiento. Desafortunadamente, el láser quema también la retina sana, pues lo que hace es destruir una pequeña región, buscando impedir la posterior pérdida de visión en el resto del ojo. La conveniencia de la operación depende del área de la retina que haya de ser tratada. En la mayoría de los diagnosticados de DMAE, dicha zona está ubicada bajo la región retiniana central (la fóvea), que es crítica para la visión, cuando no resulta demasiado grande para que la coagulación por láser sea beneficiosa.

Enfrentados a tan deprimente situación, investigadores de la Universidad de Harvard y de la empresa de biotecnología QLT, Inc., de Vancouver, razonaron que la TFD podría detener el crecimiento de estos vasos sanguíneos y retrasar, e incluso impedir, la ceguera. Si las porfirinas tenían la propiedad de acumularse en cualquier tejido en rápida proliferación —el problema mismo del cáncer— tal vez pudieran acumularse también en los vasos sanguíneos subyacentes a la retina. La verteporfirina, una nueva porfirina sintética, parecía prometedora, porque tenía un buen historial en los estudios preclínicos sobre animales, efectuados en QLT y en la Universidad de Columbia Británica a finales de los años ochenta y principios de los noventa.

La verteporfirina se acumula en los vasos retinianos anómalos con notable rapidez: en un plazo de unos 15 minutos de ser inyectado por vía intravenosa en el brazo. Al ser activada por luz láser roja, la verteporfirina sella los vasos, dejando a salvo la retina superyacente. Los posibles vasos que vuelvan a crecer pueden ser erradicados en ciernes mediante ulteriores tratamientos. Dos grandes ensayos clínicos, dirigidos por Neil M. Bressler, del Instituto Oftalmológico Wilmer de la Universidad Johns Hopkins, confirmaron que la TFD puede ser aplicada seis o siete veces a lo largo de un período de tres años, sin lesionar una retina sana. En quienes sufren la forma más agresiva de DMAE (con las lesiones más "clásicas"), la verteporfirina redujo a la mitad el riesgo de pérdida moderada o grave de la vista en un período de dos años. El efecto se mantiene por lo menos durante tres o cuatro años: los enfermos no tratados pierden tanta visión en tres meses como los tratados con verteporfirina en tres años. El tratamiento funcionó, aunque peor, en sujetos con tipos menos agresivos de DMAE y en enfermedades asociadas (la miopía patológica y el síndrome de histoplasmosis ocular). Sólo una pequeña proporción de pacientes sufrieron quemaduras por luz solar u otros sucesos adversos, que raramente duraron más de las 24 horas posteriores a la realización del procedimiento.

Algunos participantes en los ensayos obtuvieron escasos beneficios de la TFD. En muchos de ellos, es muy posible que la enfermedad se hallara en un estadio muy avanzado. Un segundo análisis de los datos clínicos presentados por Bressler en abril de 2002, en el curso del Congreso Internacional de Oftalmología de Sidney, puso de manifiesto que las microlesiones respondían mucho mejor al tratamiento que las lesiones grandes y antiguas. Por tanto, la detección precoz y su tratamiento inmediato pueden optimizar los beneficios de la TFD.

Otras líneas de tratamiento

El éxito de los tratamientos oftálmicos con TFD ha inspirado actividades investigadoras en otros campos, pero también ha puesto de relieve los inconvenientes del tratamiento. En particular, ni siquiera la luz roja penetra más de unos centímetros en los tejidos biológicos (*véase la figura 3*). Esta limitación amenaza la utilidad de la TFD en medicina interna: su importancia podría parecer meramente epidérmica. No obstante, existen medios de llevar la TFD hacia el in-



Terapias fotodinámicas

LOS FARMACOS FOTOACTIVADOS que se mencionan a continuación son una muestra de los ya comercializados o se están desarrollando.

PRINCIPIO ACTIVO	DIANA	ESTADO ACTUAL
Levulan (ácido 5-aminolevulínico)	Acné y queratosis actínica (una enfermedad precancerosa de la piel), Esófago de Barrett (adenocarcinoma esofágico, enfermedad precancerosa)	Comercializado para la queratosis actínica; para la enfermedad esofágica han concluido ensayos de Fase II (estudios relativamente pequeños en humanos)
Photofrin (porfímero-sodio)	Cánceres de esófago y de pulmón, displasias importantes producidas por esófago de Barrett	Comercializado para cáncer esofágico; y para cáncer de pulmón de células no pequeñas
Visudyne (verteporfin)	Degeneración macular asociada a la edad, miopía patológica e histoplasmosis ocular (enfermedades oftálmicas)	En el mercado
Metvix (ácido metilaminolevulínico)	Queratosis actínica, cáncer de las células dérmicas basales y cáncer de las células escamosas de la piel	Pendiente de aprobación definitiva por la FDA para la para la queratosis actínica; en ensayos de Fase III (estudios de eficacia en gran número de personas) para cánceres de piel
PhotoPoint SnET2 (etiopurpurina-etilo-estaño)	Degeneración macular asociada a la edad	Completados los ensayos de Fase III
verteporfin	Cáncer de las células basales, alopecia androgénica (calvicie del varón) e hiperplasia prostática (agrandamiento de la próstata)	En ensayos de Fase III para el cáncer de células basales; como QLT0074, en ensayos de Fase I (ensayos de seguridad en pequeño número de pacientes) para las otras enfermedades
PhotoPoint MV9411 (contiene indio)	Psoriasis de placas	En ensayos de Fase II
Antrin (motexafin lutetium)	Trastornos arteriales	Se han completado ensayos de Fase II para enfermedad de arterias periféricas y ensayos de Fase I para las arterias coronarias
Lutrin (motexafin lutetium)	Tumores cancerosos	En ensayos de Fase I para cáncer de próstata y neoplasia cervical intraepitelial

INFORMACION RECOPILADA POR TARIQ MALIK

terior. Una idea ingeniosa es la fotoangioplastia, aplicada ya en el tratamiento de la enfermedad de las arterias coronarias.

La angioplastia coronaria es un procedimiento apenas agresivo para el tratamiento de arterias afectadas de aterosclerosis. Se vale de un globo diminuto para aumentar la luz de la arteria, con el fin de que las placas ateroscleróticas no cieguen el vaso. La fotoangioplastia podría obviar muchos de los problemas de la angioplastia tradicional, especialmente la restenosis (reestrechamiento) de las arterias tratadas. El procedimiento consiste en inyectar una porfirina en el torrente sanguíneo, esperar a que se acumule en las paredes arteriales lesionadas e iluminar después la arteria desde su interior, utilizando una fuente minúscula de luz instalada en el extremo de un catéter. La luz activa la porfirina de las placas y provoca la destrucción de los tejidos anormales, sin afectar a las paredes sanas de la arteria. Los resultados de un pequeño ensayo en humanos, en el que se ponía a prueba la seguridad de una porfirina sintética, la motexafin lutetium, fueron dados a conocer en marzo de 2002 por Jeffrey J. Popma, del Brigham and Women's Hospital, en el congreso anual del Colegio Norteamericano de Cardiología. Aunque todavía se encuentra en las fases iniciales del proceso de ensayo, los hallazgos son alentadores: el procedimiento era seguro, y su éxito en la prevención de restenosis aumentaba con la dosis.

La acumulación de porfirinas en las células activas y proliferantes suscita la posibilidad de tratamiento de otras dolencias resultantes de la activación o multiplicación celular anómala; por ejemplo, en las enfermedades infecciosas. Las tentativas de tratamiento de infecciones con los pigmentos habían fracasado por culpa de un limitado efecto sobre las bacterias gramnegativas, que están provistas de una pared celular compleja que les impide la absorción de porfirinas. Una solución, desarrollada por Michael R. Hamlin y sus colegas de Harvard, consistía en ligar un polímero a la porfirina; por lo general, se emplea la polilisina, una cadena repetitiva cuyo eslabón es la lisina, un aminoácido. El polímero abre una brecha en la estructura lipídica de la pared bacteriana, franqueándoles a las porfirinas la entrada en la célula. Una vez en el interior, pueden ser activadas mediante luz para matar a la bacteria. En estudios recientes realizados so-

bre animales con infecciones bucales o heridas infectadas, la porfirina alterada demostró poseer una potente actividad antimicrobiana frente a un amplio espectro de bacterias gram-negativas y gram-positivas. Al irse redoblando la resistencia antibiótica, la TFD específica podría convertirse en un recurso útil del armamentario médico.

Diversos otros métodos fotodinámicos asociados se basan en el descubrimiento de que las células inmunitarias activadas absorben mayores cantidades de fotosensibilizadores que las células inmunitarias quiescentes y los hematíes, lo que pone a las células inactivas a salvo de daños irreversibles. En las infecciones no conviene destruir células inmunitarias activas, pues, a la postre, son las responsables de la respuesta del organismo ante la infección. En estos casos, ir en contra de las células inmunitarias sería atacar a nuestras propias fuerzas, y daría rienda suelta a la infección para entrar a saquear nuestro organismo.

En el sida, sin embargo, lo contrario es cierto. El virus de la inmunodeficiencia humana (VIH) infecta a las propias células inmunitarias. Poner la diana en las células inmunitarias infectadas sería como eliminar a los agentes dobles. En el laboratorio, las células inmunitarias infectadas por VIH incorporan porfirinas, volviéndose de este modo vulnerables a la fototerapia. El tratamiento podría aplicarse a los enfermos, bien extrayéndoles sangre, iluminándola y transfundiéndola de nuevo en el paciente (fototerapia extracorpórea), o bien iluminando su piel con luz roja, en la llamada fototerapia transdérmica. En la metodología transdérmica, la luz eliminaría de la circulación sanguínea las células inmunitarias activas conforme fueran pasando por la piel. La cuestión de si esta técnica tendrá la potencia suficiente para eliminar las células inmunitarias enfermas en los pacientes infectados por VIH está todavía sin respuesta.

Las enfermedades autoinmunitarias, el rechazo de órganos transplantados y las leucemias se encuentran enhebradas por el hilo común de la aparición de células inmunitarias activadas y proliferantes. En las enfermedades autoinmunitarias, determinados componentes de nuestro organismo provocan por error la activación de células del sistema inmunitario. Seguidamente, estos clones activados proliferan, listos para destruir el supuesto peligro; por ejemplo, la vaina de mielina en la esclerosis múltiple o el colágeno en la artritis reumatoide. En los trasplantes de órganos, las células inmunitarias activas pueden multiplicarse para rechazar el tejido foráneo: el órgano transplantado e incluso los tejidos del nuevo hospedador, en el caso de transplantes de médula ósea. En la leucemia, las células inmunitarias y sus precursoras de la médula ósea producen un gran número de células no funcionales. En todos los casos, la TFD podría eliminar las células inmunitarias indeseables, respetando al mismo tiempo las células quiescentes, con el fin de mantener una respuesta inmunitaria normal ante una infección. Lo mismo que el caso de la infección por VIH, el procedimiento podría funcionar por vía extracorpórea o transdérmica. Gran parte de estas investigaciones se encuentran en fases preclínicas avanzadas o en de ensayo clínico inicial. En vista del gran ingenio dedicado a la exploración de posibles aplicaciones médicas, empero, sólo cabe esperar que los estudios clínicos más extensos rindan fruto.

Bibliografía complementaria

THE COLOURS OF LIFE: AN INTRODUCTION TO THE CHEMISTRY OF PORFIRINS AND RELATED COMPOUNDS. L. R. Milgrom, Oxford University Press, 1997.

LETHAL WEAPON. P. Moore en *New Scientist*, vol. 158, n.º 2130, págs. 40-43; 18 de abril, 1998.

VERTEPORFIRIN THERAPY FOR SUBFOVEAL CHOROIDAL NEOVASCULARIZATION IN AGE-RELATED MACULAR DEGENERATION: THREE-YEAR RESULTS OF AN OPEN-LABEL EXTENSION OF 2 RANDOMIZED CLINICAL TRIALS. Informe TAP n.º 5. M. S. Blumenkratz *et al.* en *Archives of Ophthalmology*, vol. 120, n.º 10, págs. 1307-1317; octubre, 2002.

OXYGEN: THE MOLECULE THAT MADE THE WORLD. Nick Lane. Oxford University Press (en prensa).

El Artico eurasiático durante el último período glacial

Una vasta capa de hielo cubrió en tiempos el mar de Barents. Su brusca desaparición hace cien siglos proporciona una lección sobre la Antártida Occidental de hoy

Martín J. Siegert, Julian A. Dowdeswell, John-Inge Svendsen y Anders Elverhøi

Allá por el decenio de 1970, mucho antes de que el calentamiento global se hubiera convertido en una preocupación pública, un glaciólogo de la Universidad estatal de Ohio, John Mercer, propaló una inquietante semejanza. La geografía de la Antártida Occidental, explicaba, se parece muchísimo a la del Artico eurasiático. Ambas regiones polares poseen una gran plataforma continental de sólo algunos centenares de metros de espesor. La mayor diferencia es que una de esas plataformas, la de la Antártida Occidental, sigue cubierta por una capa de hielo de dos kilómetros y medio de espesor, mientras que en el Artico eurasiático abunda mucho menos el hielo posado sobre suelo. Según el razonamiento de Mercer, si el calentamiento global continuara se correría un gran peligro de que la inmensa capa de hielo que cubre la Antártida Occidental se desintegrase y añadiera agua al océano como para elevar el nivel del mar seis metros. Se inundarían tierras costeras de todo el mundo.

Mercer comprendió que su comparación imponía una tarea: para calibrar si la capa de hielo de la Antártida Occidental corre verdadero riesgo de descomponerse, debían buscarse indicios en la otra punta de la Tierra, en los restos geológicos de las antiguas capas de hielo que cubrieron el norte de Eurasia. Muchos geólogos aplicaron sus diversas especializaciones a la investigación. Enseguida empezaron a sacar a luz la historia glacial del Artico eurasiático. Para mediados del decenio de 1980, sin embargo, la interpretación de las observaciones geológicas variaba enormemente. Algunos veían pruebas de que en el momento más intenso de la última era glacial (el "Ultimo máximo glacial", o UMG), una inmensa capa de hielo de 3,5 kilómetros de espesor cubría la totalidad del norte de Europa y Siberia. Otros impugnaban esta apreciación; preferían creer que apenas hubo hielo alguno sobre el fondo del mar al norte de la tierra firme de Noruega y Rusia. La bibliografía da testimonio de la disputa entre estos dos puntos de vista contradictorios. El problema estribaba, en parte, en que cueste tanto descifrar el archivo geológico del Artico; la dificultad propicia las falsas interpretaciones. Otro obstáculo era la escasez de observaciones fidedignas de esa remota e inhóspita región.

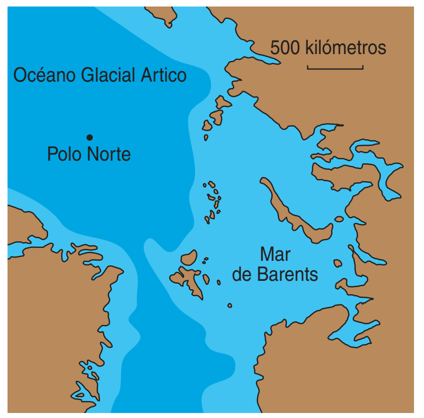
Para resolver el dilema, la Fundación Europea de la Ciencia organizó, sin solución de continuidad, diversas campañas para la obtención de indicios geológicos en la vecindad de las antiguas capas de hielo del Artico eurasiático. Participaron más de 50 científicos de siete países europeos, entre ellos nosotros cuatro. El primero de los progra-

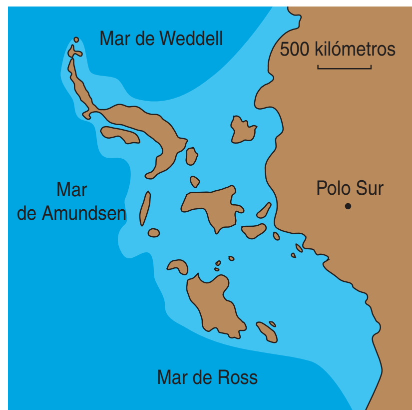
Los autores

MARTIN J. SIEGERT, profesor del Centro de Glaciología de Bristol, estudia glaciología y ciencia del Cuaternario. JULIAN A. DOWDESWELL enseña geografía física y es miembro del Instituto Scott de Investigación Polar de la Universidad de Cambridge. JOHN-INGE SVENDSEN es profesor del departamento de geología de la Universidad de Bergen, Noruega. Dirige el proyecto, patrocinado por la Unión Europea, *Las capas de hielo y el clima en el Artico eurasiático durante el último máximo glacial*. ANDERS ELVERHØI, docente de geología cuaternaria, preside el departamento de geología de la Universidad de Oslo.



mas, PONAM (de *PO*lar *N*orth *A*tlantic *M*argins, Márgenes Polares del Atlántico Norte), se centró en la parte oeste del mar de Barents; el siguiente, QUEEN (*Q*Uaternary *E*nvironments of the *E*urasian *N*orth, Entornos Cuaternarios del Norte Eurasiático), más al este, en el Artico ruso. Estos trabajos proporcionaron una gran cantidad de información sobre las condiciones del norte de Eurasia en la Edad Glacial. Para captar toda la importancia de los resultados, hay que comprender, al menos en líneas generales, los procesos glaciológicos. Por ello nos detendremos un momento a repasar los rudimentos de la ciencia de los glaciares.





1. BARRERAS DE HIELO FLOTANTE (*arriba*) rodean la gélida costa de la Antártida. Si el calentamiento global destruyese estos amortiguadores, la enorme capa de hielo marino, posada sobre suelo, de la Antártida Occidental quedaría directamente expuesta al mar. Su fusión se aceleraría; las costas de todo el mundo se inundarían. Los autores y sus colaboradores han examinado un episodio similar, sucedido en el hemisferio norte hace 15.000 años: la desaparición de la gran capa de hielo que en tiempos ocupó el mar de Barents. La comparación es apropiada porque la amplia plataforma continental de mar de Barents (*azul claro, a la derecha*) se asemeja a la configuración que la Antártida Occidental adquiriría si los hielos se fundieran allí (*extremo derecho*).

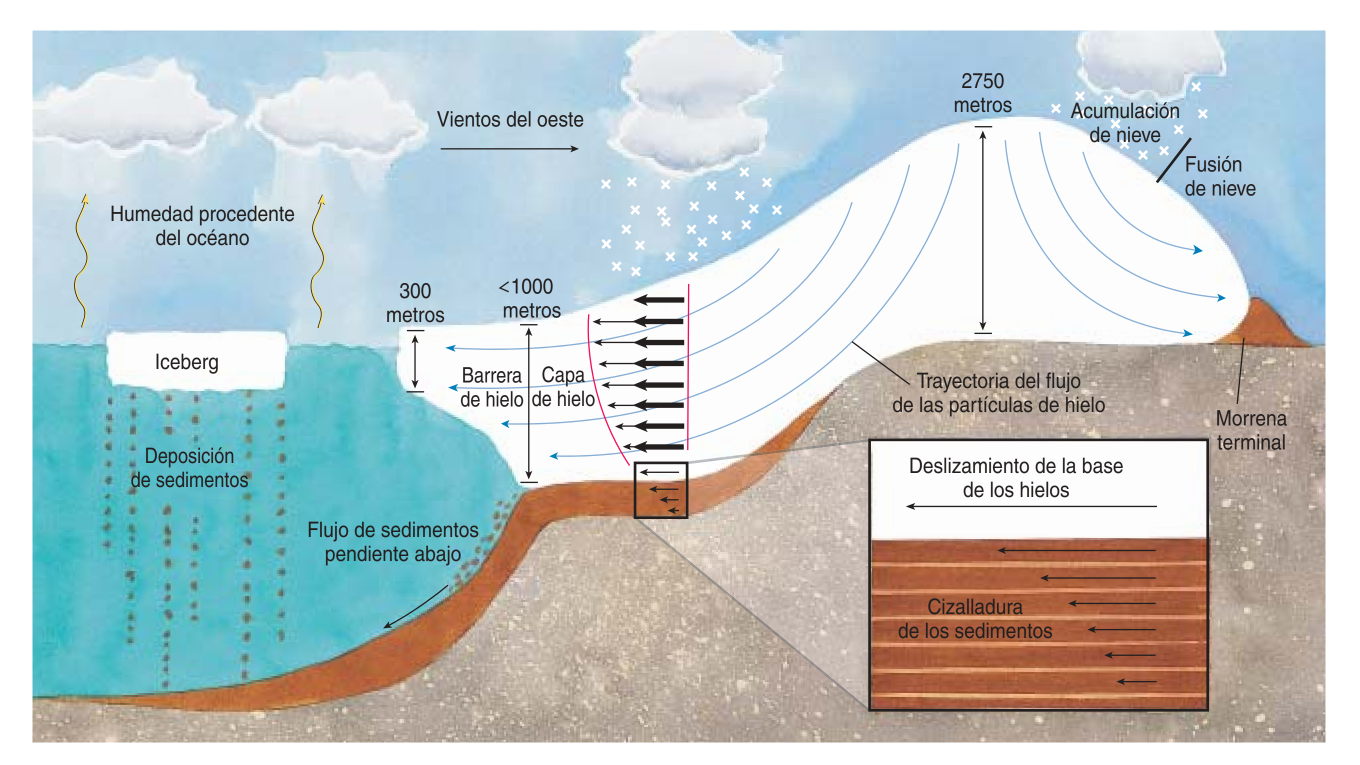
P&J CLEMENT/*Photo Researchers, Inc.* (*fotografía*); J. H. MERCER (*mapas*)

Glaciología elemental

Pese a su solidez, el hielo se deforma, muy lentamente, cuando se le aplica una gran tensión, como la que le induce a una capa de hielo su propio, enorme peso. Esa deformación imparte a una porción de hielo del interior del glaciar un movimiento lento. Una parte del hielo de la superficie del glaciar queda enterrada por subsiguientes nevadas; se hunde entonces en el seno de la capa a una velocidad apreciable con respecto a la de la deformación. En conjunto, el hielo tiende a descender por el centro y a moverse hacia fuera por los lados.

Más en concreto, el flujo existente en el centro de una capa de hielo irradia desde la divisoria del hielo, el lugar donde no hay movimiento lateral en la superficie. A medida que el hielo se aleja de la divisoria, su velocidad lateral aumenta, desde un valor inicial de tal vez algunos metros por año. Más cerca de los márgenes, rápidos ríos de hielo —las "corrientes de hielo"— "drenan" eficazmente las capas de hielo. Las corrientes de hielo fluyen a varios cientos de metros por año. Le deben esa rapidez a que el agua presente en la base reduce el rozamiento; el hielo desliza gracias a ella sobre el suelo subyacente. La deformación interna no aporta mucho a la velocidad total.

En términos generales, el hielo continúa fluyendo a una velocidad



2. CORTE VERTICAL ESQUEMATICO de la región del mar de Barents durante el apogeo de la última Edad del Hielo; se representa el flujo de hielo (*flechas azules*). Por el extremo derecho (que representa el límite meridional de la capa de hielo), la fusión tiene lugar a la misma velocidad a que se aporta hielo. Aquí, el material rocoso arrastrado por el hielo forma una morrena terminal. En el extremo izquierdo (que representa los límites septentrional y occidental de la capa de hielo) se forma una barrera de hielo flotante. Ya en tierra, está la porción marina de la capa de hielo, la parte que descansa sobre roca bajo el nivel del mar. Aquí el hielo fluye con cierta rapidez porque el movimiento horizontal tiene dos componentes: la deformación interna (*flechas negras finas*) y el deslizamiento sobre la base (*flechas negras gruesas*). El deslizamiento puede ser considerable, lubricado por los sedimentos subyacentes, que se deforman para acomodarse al movimiento (*recuadro*).

cada vez mayor, hasta que acaba desapareciendo, sea en tierra (deteniéndose porque el hielo superficial se funda tan deprisa como se le reemplaza), sea en el mar. Cuando una capa de hielo fluye intacta hasta el océano y flota sobre él, forma una barrera de hielo, que pierde masa al desprenderse icebergs de sus bordes e irse fundiendo desde abajo.

Al fluir sobre la tierra, las capas de hielo la erosionan. Sus bases arrastran sedimentos. Transportan este material rocoso a grandes distancias antes de depositarlo por fin en sus márgenes. Por eso se ven delante de cada glaciar morrenas, sedimentos amontonados que recuerdan escombros. Una vez los glaciares y las capas de hielo se han fundido, quedan las morrenas, convertidas así en indicadores geológicos de la extensión del hielo en el distante pasado. Parecerá elemental reconstruir los límites de una antigua capa de hielo: basta con cartografiar la posición de las morrenas terminales. Pero no es tan sencillo; faltan en algunas zonas morrenas terminales, o se encuentran ahora bajo el nivel del mar. No es raro que varias morrenas de diferentes avances glaciales se mezclen desordenadamente y cueste distinguir la que importa.

Criba de escombros

Tras diez años de esfuerzo concertado, los programas PONAM y QUEEN han recogido una gran cantidad de información geológica acerca de las antiguas capas de hielo que de tiempo en tiempo cubrieron vastas zonas del Artico Eurasiático. Nuestro trabajo proporcionó tres importantes descubrimientos. En primer lugar, documentó la formación de una gran capa de hielo de origen marino en la plataforma continental del mar de Barents durante el UMG, hará unos 20.000 años. En esa época, la capa de hielo de Barents se unió con la escandinava; una cubierta continua de hielo iba de Alemania y el Reino Unido en el oeste hasta el mar de Kara en el este, pasando por Escandinavia y la barrera del mar de Barents. En segundo lugar, halló que hubo corrientes de hielo rápidas que transportaron grandes volúmenes de sedimento glacial al margen continental. En tercer lugar, demostró que la plataforma de hielo desapareció rápidamente al final de la Edad del Hielo. ¿Cómo llegamos a esas conclusiones y por qué son importantes?

Sabemos que el mar de Barents estuvo helado durante el pasado geológico reciente porque bajo el fondo hay unos pocos metros de fango blando. El sedimento que se encuentra bajo esta delgada capa de barro, muy comprimido por el enorme peso de la última capa de hielo, está plagado de restos de origen glacial. Abundan las capas de

sedimento de esa naturaleza (*tills*) a lo largo y ancho de la plataforma continental. En las partes centrales del mar de Barents, la capa de hielo también dejó tras sí una serie de largos surcos paralelos, que reflejan anteriores movimientos del hielo. Para evaluar las dimensiones y edad de aquella capa de hielo, emprendimos, como muchos compañeros nuestros, diversas investigaciones geológicas en la región del mar de Barents y a lo largo del margen septentrional del continente eurasiático.

Los estudios geológicos de campo se iniciaron en Svalbard, un grupo de islas situado 600 kilómetros al norte de la península escandinava. Las costas elevadas de este archipiélago y, más al este, de la Tierra de Francisco José nos indicaron que la parte norte del mar de Barents se hundió bajo el peso de una gran carga de hielo durante el UMG. Esas costas elevadas se forman cuando las olas rompen contra las playas y las excavan. Una vez fundido el hielo, la corteza sube y transforma las playas en terrazas elevadas. A lo largo de la costa occidental de Svalbard hay también playas así, con conchas y huesos de ballena que tienen, según la datación con radiocarbono, más de 40.000 años de antigüedad. Muchos creían que la presencia de material orgánico de esa edad probaba que los glaciares no podían haber alcanzado la costa una vez creadas las playas elevadas. Jan Mangerud, geólogo noruego de la Universidad de Bergen, logró entonces un nuevo e importante descubrimiento. Halló que al menos parte de las viejas playas elevadas había estado recubierta por hielo; quería decir que durante el UMG los glaciares recubrieron una porción de Svalbard mucho mayor de lo que se había imaginado.

Trabajos ulteriores revelaron que los principales fiordos estuvieron cubiertos de hielo en aquella época y que la totalidad del archipiélago quedó debajo de una capa de hielo centrada en el fondo del mar, al este de Svalbard. Para establecer por dónde caía el borde occidental de la capa de hielo, muchos investigadores colaboraron en la determinación de las características sedimentarias del fondo marino a lo largo del margen continental del oeste de Eurasia. Se emplearon diversas clases de sondeos sísmicos y acústicos, y se efectuaron perforaciones en el sedimento para extraer testigos. Encontraron así grandes volúmenes de sedimentos glaciares, dispuestos a lo largo del talud continental en grandes complejos con forma de abanico. La capa superior de esos sedimentos se originó en la última glaciación extensa; sitúan, sin duda, el borde de la antigua capa de hielo en el margen de la plataforma. La gran cantidad de material transportado a esos abanicos demuestra que tuvo que haber corrientes rápidas de hielo activas a través de la parte occidental de la capa de hielo.

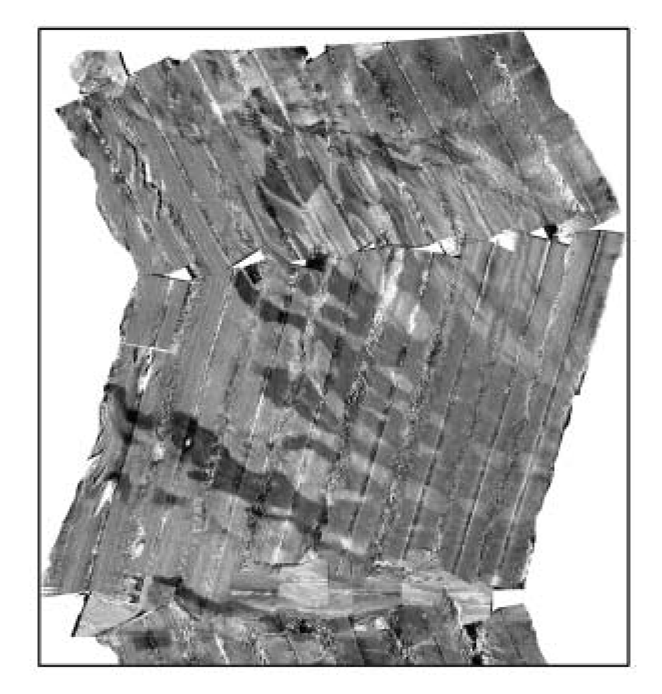
Más ha costado establecer los márgenes meridional y oriental de la antigua capa helada. A fines del decenio de 1970, Mikhail Grosswald, conocido geógrafo de la Academia Rusa de Ciencias en Moscú, presentó su hipótesis: una capa de hielo panártica de 3,5 kilómetros de espesor cubrió vastas regiones del Artico europeo y Siberia durante la UMG. Su hipótesis, puesta en duda por muchos científicos rusos, fue pronto aceptada por la mayoría de la comunidad científica occidental. Mientras tanto, Valery Astakhov, geólogo del Instituto Nacional de Métodos Geológicos de Exploración Remota, en San Petersburgo, excavaba en las heladas tierras de Siberia Occidental en busca de los escondidos restos de la última capa de hielo. Halló que una capa centrada en la barrera del mar de Kara avanzó hacia el sur a través del valle del río Yenissei, pero el episodio tuvo lugar mucho antes del UMG. Quedaba claro que algún error había en la hipótesis de Grosswald.

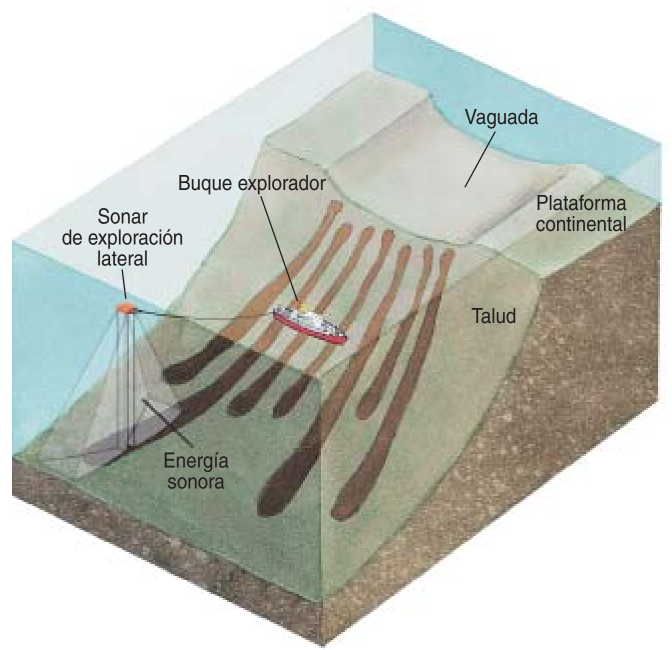
El programa QUEEN descubrió que un cinturón de morrenas que parecían recientes, en la parte europea del Artico ruso (al este del mar Blanco), en realidad se depositaron hace 60.000 años, unos 40.000 antes del UMG. Para situar el margen de los hielos del UMG fue preciso, por tanto, volver los ojos una vez más hacia el mar.

El examen de los sedimentos del fondo marino frente a la costa de la Rusia continental ha confirmado que la capa de hielo más reciente llegaba hasta la plataforma continental. Los testigos extraídos del mar de Péchora muestran que la sedimentación marina ha proseguido en esa región durante los últimos 40.000 años, mientras que en la zona acotada por el margen que se deduce tuvo la capa de hielo, los depósitos marinos más antiguos sobre la superficie del *till* tienen menos de 14.000 años. Las investigacio-



3. LAS INVESTIGACIONES GEOLOGICAS de los últimos años han precisado por dónde pasaba el margen de la capa de hielo (*línea continua*) durante el Último Máximo Glacial, hará unos 20.000 años. La parte discontinua de la línea indica dónde sigue siendo algo incierta la posición del antiguo límite.





4. LAS EXPLORACIONES DEL FONDO MARINO efectuadas con el sonar de barrido lateral revelan largas lenguas de sedimentos glaciares (*zonas oscuras, izquierda*). Estos depósitos se extienden desde el borde de la plataforma continental; descienden por el talud continental hacia las profundidades marinas (*derecha*). La gran cantidad de sedimentos necesaria para formar estos característicos depósitos indica que deben haber sido transportados por una capa de hielos marinos que llegaron hasta el borde de la plataforma continental.

CORTESIA DE M. J. SIEGERT, J. A. DOWDESWELL, J.-I. SVENDSEN y A. ELVERHOI (*Imagen de sonar*)

nes geológicas de la península de Yamal, que se proyecta hacia el mar de Kara, han mostrado que la capa de hielo tampoco alcanzó aquella región. Así, el límite meridional de la capa de hielo debió de encontrarse algo más al norte, en zonas poco profundas del mar de Kara.

La posición del borde oriental de la capa de hielo es igualmente difícil de determinar con precisión. Una vía consiste en estudiar los depósitos sedimentarios en los muchos lechos de lagos de la península de Taymyr, al este del mar de Kara. Están compuestos por fango de grano fino. Si hubiera existido una capa de hielo en la península, un material grueso, fácilmente discernible, de origen glacial, habría reemplazado o cubierto esos sedimentos. Sin embargo, las secuencias de sedimentos en esos lagos reflejan una acumulación continua de sedimentos no glaciales durante todo el UMG, lo que significa que las partes centrales de la península de Taymyr estaban libres de hielo al mismo tiempo que, al oeste, una capa de hielo se extendía por los mares de Barents y Kara.

Un grupo de geólogos dirigido por Christian Hort, de la Universidad de Lund, en Suecia, llegó a la conclusión de que el borde noroeste de la península de Taymyr sí conoció hielos glaciares hace menos de 20.000 años. Cree, no obstante, que no se trataba de una extensión de la gran capa de hielo que cubría el mar de Kara. Es más probable que fuera parte de un glaciar de menor tamaño, posado sobre el fondo marino de cerca de la costa, poco profundo.

En Severnaya Zemlya, grupo de islas al norte de la península de Taymyr, se han descubierto colmillos de mamut de hará entre 25.000 y 19.000 años; parece, lo que resulta sorprendente, que los glaciares de este archipiélago fueron durante el UMG todavía menores de lo que se muestran hoy. Como se ve, sigue siendo bastante difícil trazar el borde oriental de la antigua capa de hielo.

Causas primarias

Para conocer la historia glacial entera del Artico eurasiático durante la última edad de hielo, hay que tener en cuenta por qué surgen los períodos glaciales en general y cómo llenan un mar continental con hielo de más de un kilómetro de espesor. El archivo geológico indica que se formaron y deshicieron repetidamente grandes capas de hielo en el Artico eurasiático, a causa de pronunciadas oscilaciones climáticas, a lo largo de los últimos 2.700.000 años. El anterior *intervalo interglacial* durante el cual el clima de la Tierra fue comparable con el actual duró desde hace 128.000 hasta hace 115.000 años. Fue seguido por una edad del hielo que terminó bruscamente hace 11.700 años. Durante esta edad de hielo tuvieron lugar hasta tres períodos de avance y retroceso glacial. La más reciente capa de hielo de la plataforma continental comenzó a formarse hará unos 30.000 años y alcanzó su máxima extensión unos 10.000 años después.

En una edad de hielo, volúmenes inmensos de agua pasan de los océanos a las capas de hielo polares; el nivel del mar desciende a veces hasta 120 metros. Aporta el registro más claro de esta vasta redistribución de agua el examen de los tres isótopos naturales del oxígeno (O^{16}, O^{17} y O^{18}) en diferentes materiales geológicos. ¿Por qué nos dicen tanto? El agua que contiene la forma más ligera del oxígeno (O^{16}) se evapora

más deprisa que la compuesta por los isótopos más pesados (O^{17} y O^{18}). El agua formada por "oxígeno ligero" va a parar sobre todo a las capas de hielo. En consecuencia, durante una edad de hielo el agua de los océanos se enriquece en oxígeno pesado. Así, por ejemplo, la concha de carbonato cálcico ($CaCO_3$) que un organismo marino construya en una época glacial contendrá una proporción de oxígeno pesado superior al promedio. Cuando el organismo muere, la concha cae al fondo del mar y deja un testimonio del estado isotópico del océano en el pasado.

Los geólogos han acumulado muchos largos registros de las variaciones de los isótopos de oxígeno gracias al análisis de sedimentos sacados del fondo del océano profundo. Han medido también la composición isotópica del hielo que se ha acumulado en la Antártida. Las variaciones de los isótopos de oxígeno procedentes del hielo y de los sedimentos oceánicos arrojan unos resultados muy parecidos: los cambios climáticos asociados con las edades del hielo se repiten con frecuencias de unos 100.000, 40.000 y 20.000 años. ¿Por qué oscila el clima con esas tres frecuencias? La respuesta reside en la órbita de la Tierra alrededor del Sol.

El primer parámetro orbital a considerar es la *excentricidad*, o desviación de la perfecta forma circular. La órbita de la Tierra varía de una trayectoria elíptica a una circular con una frecuencia de 100.000 años, en números redondos. El segundo parámetro de interés es la inclinación del eje de la Tierra, que oscila entre 22,2 y 24,5 grados con una frecuencia de unos 40.000 años. El tercero es la posición de la Tierra en su órbita elíptica durante el verano del hemisferio norte; varía con una frecuencia de alrededor de 20.000 años. Esas oscilaciones afectan a la cantidad de radiación recibida en la superficie de la Tierra en varias épocas del año. Si los tres parámetros orbitales coinciden en reducir la radiación en el hemisferio norte en verano, los glaciares y las capas de hielo se expandirán y empezará una edad de hielo.

La relación entre las oscilaciones del clima observadas y las predicciones teóricas sobre sus períodos es excelente. Lástima que haya un pequeño problema: las variaciones en las cuantías de la energía solar asociadas con las variaciones orbitales son, con mucho, demasiado pequeñas para causar las variaciones climáticas requeridas para que se forme una capa de hielo. Se necesita un medio que amplifique ligeros efectos orbitales hasta convertirlos en drásticos cambios del clima. Hay varios posibles mecanismos de realimentación; es probable que todos contribuyan de algún modo al nacimiento y desaparición de las edades de hielo.

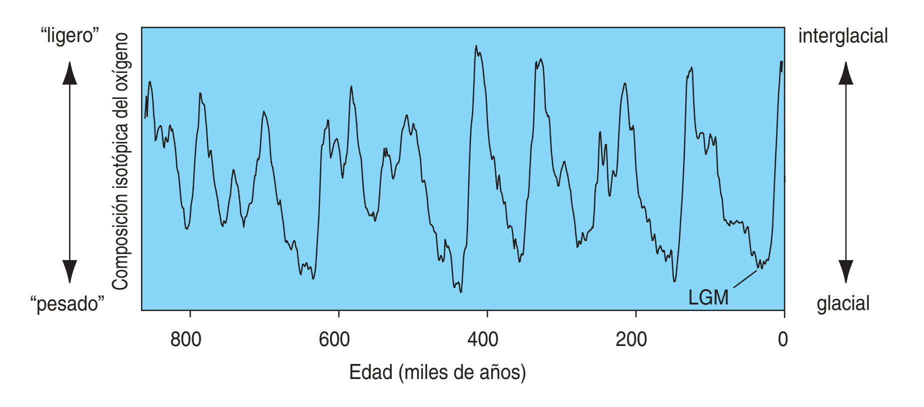
Tal vez el mecanismo más fácil de entender es la realimentación entre el hielo y el albedo. La reflectividad de la superficie terrestre (o albedo) controla la cantidad de radiación solar que se devuelve desde la Tierra al espacio. Si el albedo es alto, se refleja más radiación y la Tierra se enfría. Si el albedo es bajo, la superficie del planeta absorbe más radiación y el mundo se calienta. La nieve y el hielo son muy reflectores. Cuando los campos de nieve y las capas de hielo se extienden a causa de un enfriamiento global, el aumento del albedo de la superficie se traduce en un aumento de la reflexión de la radiación solar, lo que da por resultado un nuevo descenso de la temperatura del aire.

Otro mecanismo de realimentación depende del dióxido de carbono (CO_2) atmosférico, que afecta al clima porque refuerza el efecto de invernadero. Por razones todavía no explicadas por completo, durante las épocas glaciales la concentración de CO_2 atmosférico disminuye. Un enfriamiento que proviene de otras causas reduce, pues, el CO_2, lo que a su vez reduce el efecto de invernadero, dando por resultado un ulterior enfriamiento.

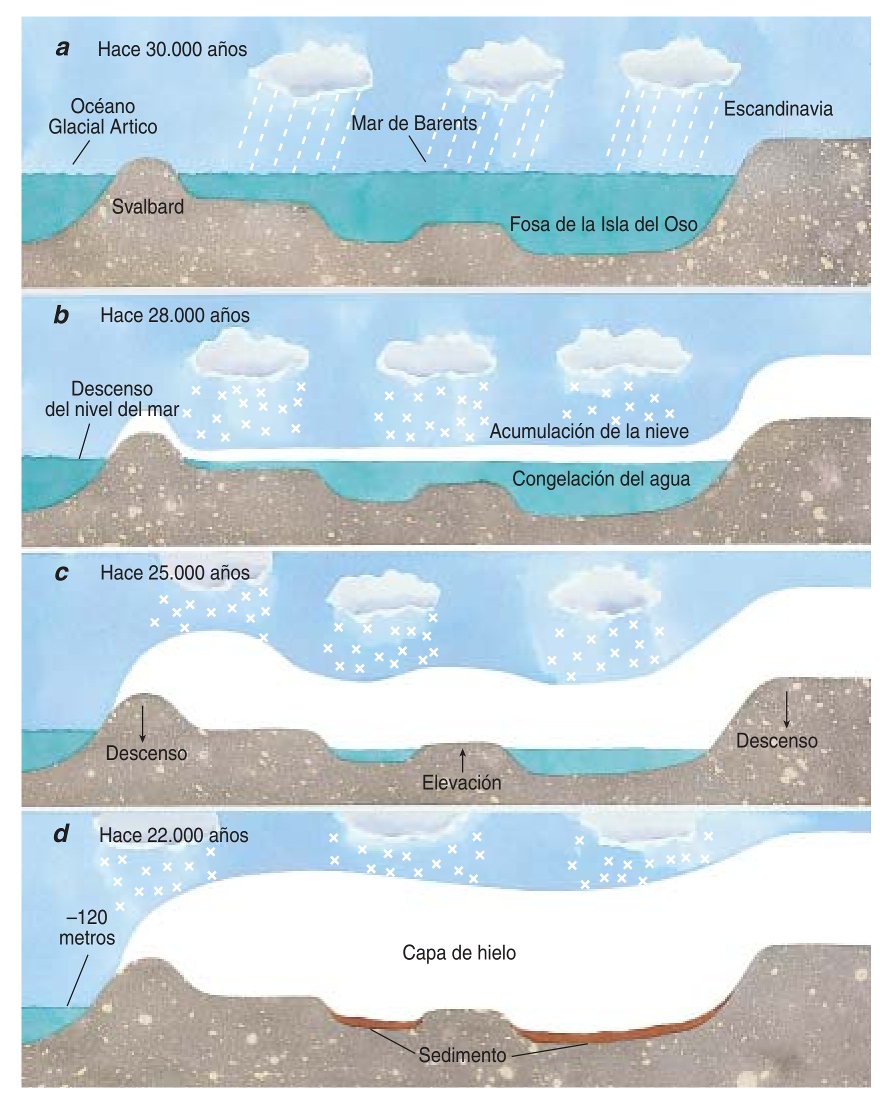
La aparición de la capa de hielo

Con un conocimiento general de las variaciones orbitales y de los mecanismos de realimentación, no cuesta concebir cómo el empeoramiento del clima da por resultado la expansión de los hielos sobre tierra firme. No es tan fácil, sin embargo, comprender por qué el enfriamiento global hace que se forme una capa de hielo en el fondo del mar. Durante muchos años se ha debatido acerca de cómo una gran plataforma continental puede llegar a cubrirse con una capa de hielo. El principal problema es que el desprendimiento de grandes icebergs del borde de una masa de hielo que toca fondo se intensifica con la profundidad del agua. Así, cuando el borde de una capa de hielo se desplaza a aguas más profundas, la frecuencia con que se desprenden icebergs aumenta. Parece que este proceso impediría ulteriores expansiones de la capa de hielo.

Según Terence Hughes, de la Universidad de Maine, pudo generarse



5. LAS VARIACIONES de la composición isotópica del oxígeno en las conchas dan constancia de muchos cambios repetidos entre condiciones glaciales e interglaciales. Durante las épocas glaciales, el oxígeno 16 "ligero" queda secuestrado en el hielo polar; el agua oceánica (y las conchas que se forman de ella) se enriquecen en el oxígeno 18 "pesado". Las investigaciones geológicas en la Eurasia de la Edad del Hielo, desde la época del Ultimo Máximo Glacial (UMG), se complican por las muchas glaciaciones, igualmente intensas, que se produjeron antes.



6. MODELO CONCEPTUAL que muestra el origen de la capa de hielo marino en la región del mar de Barents, una vez hubo pasado de ser mar abierto (*a*) a que lo cubrieran hielos perennes (*b*). La pesada acumulación de nieve y hielo en las islas del norte (*izquierda*) y sobre el continente (*derecha*) forzó la corteza terrestre hacia abajo en esas zonas; el fondo del mar se elevó entre ellas al mismo tiempo que el nivel del mar iba descendiendo (*c*). Esos procesos continuaron hasta que la masa de hielo, cada vez más gruesa, descansó directamente sobre el fondo del mar, donde dejó depósitos de sedimentos húmedos en las depresiones topográficas locales (*d*).

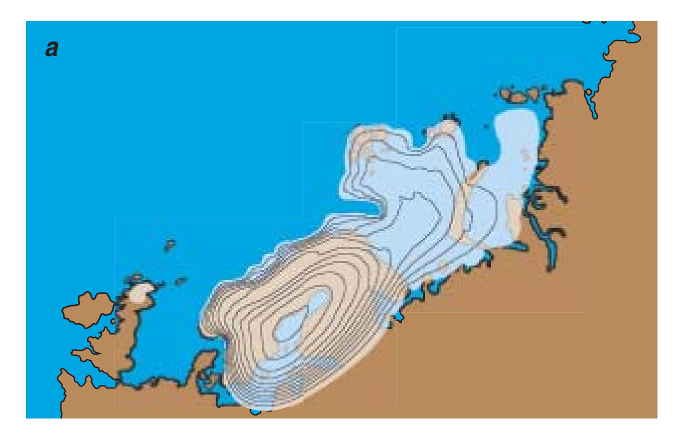
una capa de hielo posada en el fondo de la cuenca del mar de Barents a partir de una barrera —una masa sólida de hielo que flota en la superficie— preexistente. El hielo marino permanente (de unos metros de espesor) quizás aumentara hasta formar una capa de hielo que tocara fondo (con algunos cientos de metros de espesor) si la acumulación de hielo en la superficie fue durante algunos miles de años más veloz que la fusión de la base. Una plataforma de hielo en el mar de Barents habría favorecido el desarrollo de una capa que tocase el fondo por dos motivos. En primer lugar, el desprendimiento de icebergs en una capa de hielo adyacente cesaría: el hielo fluiría, sin más, hacia la barrera de hielo. En segundo lugar, ésta se iría haciendo más gruesa, hasta tocar el fondo del mar, momento en que se convertiría en parte de la propia capa de hielo posada en el fondo.

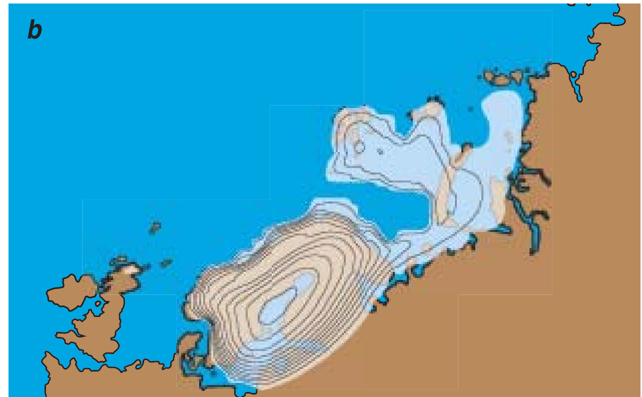
Otro mecanismo puede también haber intervenido en la constitución de una capa de hielo dentro del mar de Barents. Varios científicos han apuntado que el hielo se acumuló en un principio sobre los archipiélagos situados a lo largo del borde norte de la plataforma continental eurasiática. Su enorme peso hundió la corteza subyacente; a consecuencia de ello, se levantó la de las regiones centrales, poco profundas, del mar de Barents (de la misma manera que una fuerza aplicada hacia abajo en el centro de una barra de acero la flexiona hacia arriba en cada extremo). Con este movimiento hacia arriba, combinado con el descenso del nivel del mar (de hasta 120 metros), al hielo quizá le fuera posible colmar los bajíos. Debió de llegar hasta allí desde capas de hielos contiguas, o se formó *in situ* al espesarse el hielo marino.

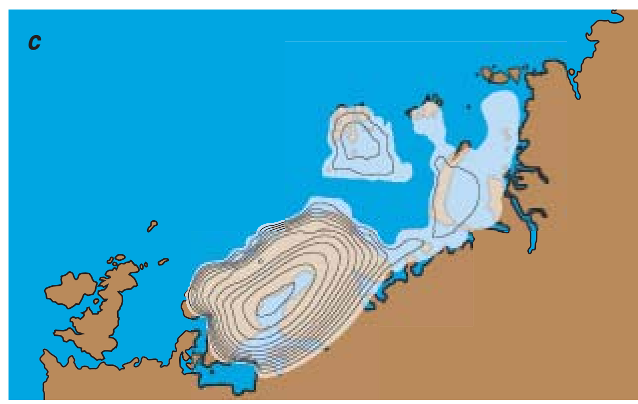
Ambos procesos pudieron actuar durante la última edad de hielo. Además, indicios procedentes de las cercanas aguas de Noruega y Groenlandia muestran que allí reinaron durante la última edad del hielo condiciones de mar abierto. Esas aguas oceánicas, tibias en comparación, proporcionaron una considerable fuente de humedad a las nevadas sobre el mar de Barents. La influencia combinada de mayores nevadas, la elevación de la corteza y el aumento de espesor de las barreras de hielo debió de conducir a la rápida congelación del mar de Barents. Los geólogos han de preguntarse no tanto cómo nacieron esos hielos, sino por qué desaparecieron.

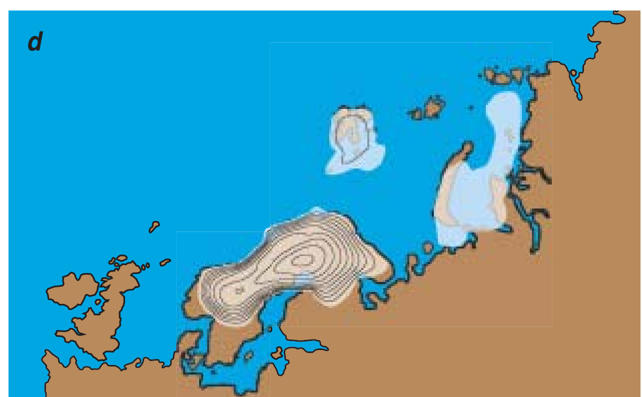
Contamos con diversas indicaciones acerca de la destrucción de la capa de hielo que en tiempos cubrió esa porción del Artico eurasiático. Según el contenido de isótopos de oxígeno de las pequeñas conchas presentes en los sedimentos del fondo del mar en el cercano estrecho de Fram y en el talud continental, abundó el oxígeno "ligero" en el agua hace 16.000 años. En este caso, los isótopos de oxígeno no reflejan el estado general del océano global. Más bien señalan una masiva entrada de agua procedente de la fusión de hielos en la región, señal a su vez de la desintegración de las masas de hielo sobre el mar de Barents al principio de la última deglaciación.

Hemos cartografiado también —al igual que otros investigadores— las









7. LAS SIMULACIONES NUMERICAS enseñan cómo debió de reducirse la capa de hielo del mar de Barents desde un espesor máximo de unos 2750 metros, que persistió hasta hace unos 14.000 años (*a*). Hará 13.000 años, gran parte de la región entre Escandinavia y Novaya Zemlya estaba libre de hielo que tocase fondo (*b*). Hace 12.000 años, el hielo que cubría Svalbard se separó de la capa que todavía cubría Escandinavia y el Artico ruso (*c*). Hace 11.000 años, el hielo en la región había adelgazado todavía más y estaba ya partido en tres masas separadas (*d*). (Los colores claros señalan dónde tenía la capa de hielo al menos 50 metros de espesor. Las curvas de nivel se dan a intervalos de 250 metros.)

morrenas abandonadas por la retirada del frente de hielo en el fondo del mar de Barents; utilizamos barcos equipados con sonar y tomas sísmicas de imágenes. Los datos indican que la capa de hielo empezó a romperse donde más profundo era el fondo en que se asentaba. Hace 14.000 años, desapareció el hielo de la fosa de la Isla del Oso y de varias depresiones locales menores; quedaron así despejadas zonas de océano, a las que rodeaban murallas de hielo que se iban desmoronando. Hace 12.000 años la desintegración de las capas había progresado: a esas alturas no existían más que en los archipiélagos septentrionales y en los mares poco profundos que los rodeaban.

La pauta de la desintegración del hielo dentro del mar de Barents quedó registrada también en el levantamiento alrededor de Svalbard y la Tierra de Francisco José. Las playas elevadas en esas islas se han datado mediante la aplicación de la técnica del radiocarbono a huesos de ballena, conchas de moluscos y trozos de maderas arrojados por la marea. Las fechas indican que el deshielo de los archipiélagos tuvo lugar varios miles de años después de que desapareciese el hielo en las regiones más profundas del mar de Barents.

Simulación numérica

En un esfuerzo por reconstruir de forma más completa la historia de esta antigua capa de hielo, hemos llevado a cabo varias simulaciones numéricas de su desaparición. Para ello la subdividimos en cierto número de “columnas de hielo”. Cada una representa una “celda” dentro de una retícula bidimensional. Los modelos de las capas de hielo suelen ejecutarse mediante un bucle de cálculo. Arranca con una serie de algoritmos que determinan en cada celda el flujo de hielo, el balance de masas y la interacción con la Tierra, y se completa mediante la aplicación a la retícula completa de una ecuación final (la ecuación de continuidad) que calcula el flujo de hielo entre celdas. Para simular la historia glacial, se deben especificar el nivel del mar, la temperatura del aire y la nieve caída en función del tiempo. Al obligar al modelo a formar una capa de hielo compatible con las observaciones geológicas, podemos juzgar las causas del crecimiento y desintegración de las capas de hielo.

Tanto el programa PONAM como el QUEEN recurrieron a las simulaciones de la capa de hielo para obtener detalles cuantitativos del tamaño y dinámica de la antigua capa de hielo. Ajustamos los parámetros ambientales que introducíamos en el modelo hasta lograr que el tamaño del hielo coincidiese con el borde de los hielos determinado por los datos geológicos. El modelo pro-

porcionó así información sobre el tamaño, espesor y velocidad de flujo de la primitiva capa de hielo.

Una vez simulamos la capa de hielo en el momento de su máximo tamaño, teníamos que lograr que se desintegrase de una manera coherente con los datos geológicos del deshielo real. Para imitar el deshielo en nuestros ordenadores, tuvimos que incrementar bastante en el modelo la frecuencia de desprendimiento de icebergs.

¿Por qué se desintegró tan rápidamente la capa de hielo real? Las simulaciones mueven a pensar que la respuesta estriba en el mecanismo de producción de icebergs. Cuando el mundo entró en la primera fase de deshielo, el nivel del mar aumentó, aunque gradualmente. El ascenso del nivel del mar produjo dos efectos sobre la capa de hielo marino que cubría el mar de Barents. En primer lugar, la profundidad de agua aumentó, dando lugar a una mayor frecuencia de desprendimiento de icebergs (si se supone que la capa de hielo descansaba en el fondo del mar). En segundo lugar, el peso efectivo de la capa de hielo se redujo, lo que llevó consigo una disminución del rozamiento de la base, mayores velocidades de los hielos y, en consecuencia, un intercambio de masa más rápido desde el interior de la capa de hielo hasta los bordes, donde se desprenden los témpanos. Estos efectos produjeron una realimentación positiva mediante la cual la desintegración de la capa de hielo, aquí y en otros lugares, condujo a una subida del nivel del mar, que a su vez condujo a mayores desprendimientos de icebergs. Así, es probable que una variación más bien pequeña del nivel del mar a principios del último deshielo desencadenase la desintegración de la capa de hielo eurasiática.

La Antártida Occidental

Durante el último período glacial, la capa de hielo de la Antártida Occidental era bastante mayor de lo que es hoy. Toda la plataforma continental debía de estar cubierta por hielo asentado en el fondo, como en el mar de Barents. Sin embargo, la desintegración de esta capa de hielo ampliada de la Antártida Occidental debió de diferir de la del hielo del mar de Barents en dos aspectos. Por un lado, el deshielo antártico comenzó mucho más tarde que en el mar de Barents. Además, dio lugar a la formación de grandes barreras de hielo que flotaban entre el mar abierto y la capa de hielo asentado en el fondo. Las barreras de hielo de Filchner-Ronne y de Ross, por ejemplo, tienen ahora, cada una, un área de alrededor de 500.000 kilómetros cuadrados.

Estas diferencias sugieren dos importantes conclusiones sobre la estabilidad de la plataforma de hielo de la Antártida Occidental. En primer lugar, las barreras de hielo afectan al mantenimiento de la estabilidad de la capa de hielo; actúan como contrafuertes que soportan el borde que toca suelo de la capa de hielo. Al faltar las barreras en el mar de Barents, ese borde desprendía a buen ritmo icebergs. En segundo lugar, una vez se tiene en cuenta que las barreras hacen de contrafuertes de las capas de hielo, las actuales variaciones del nivel del mar no son de tal magnitud que fomenten la desintegración del hielo en la Antártida Occidental hasta el extremo que se observó en el mar de Barents. Una nota tranquilizadora relacionada con esta última conclusión: durante el último período interglacial, el nivel del mar fue varios metros más alto que en la actualidad; a pesar de ello, la capa de hielo de la Antártida Occidental no desapareció. La mayor parte del agua que elevó por entonces el nivel del mar provino seguramente de Groenlandia.

No cabe duda de que la capa de hielo de la Antártida Occidental resiste considerables subidas del nivel del mar, pero ¿por qué? Muy bien pudiera ser porque las plataformas de hielos flotantes de la Antártida Occidental contribuyen a que el hielo que toca suelo no acabe vertiéndose en el mar abierto. Si es cierto, debería preocuparnos la estabilidad de las barreras de hielo en la Antártida Occidental. Su desintegración no elevaría por sí misma el nivel del mar (de igual manera que un cubo de hielo no eleva cuando se derrite el nivel del agua en el vaso). Pero si se funden, la capa de hielo de la Antártida Occidental se parecerá mucho más a la antigua capa de hielo eurasiática, tal y como era inmediatamente antes de desaparecer.

¿Qué podría causar la destrucción de las barreras de hielo? La respuesta se halla en el océano. La fusión desde el fondo constituye gran parte de la masa perdida por las barreras. Si el océano se calienta, la velocidad de fusión aumentará. Si esto no quedara compensado por el aumento de la evaporación y de las nevadas que acompañaría al calentamiento del océano Glacial Antártico, las barreras de hielo adelgazarían hasta la extinción. La capa de hielo de la Antártida Occidental estaría entonces a punto de desaparecer a su vez rápidamente. No debería ignorarse esta posibilidad, ni el consiguiente aumento global del nivel del mar.

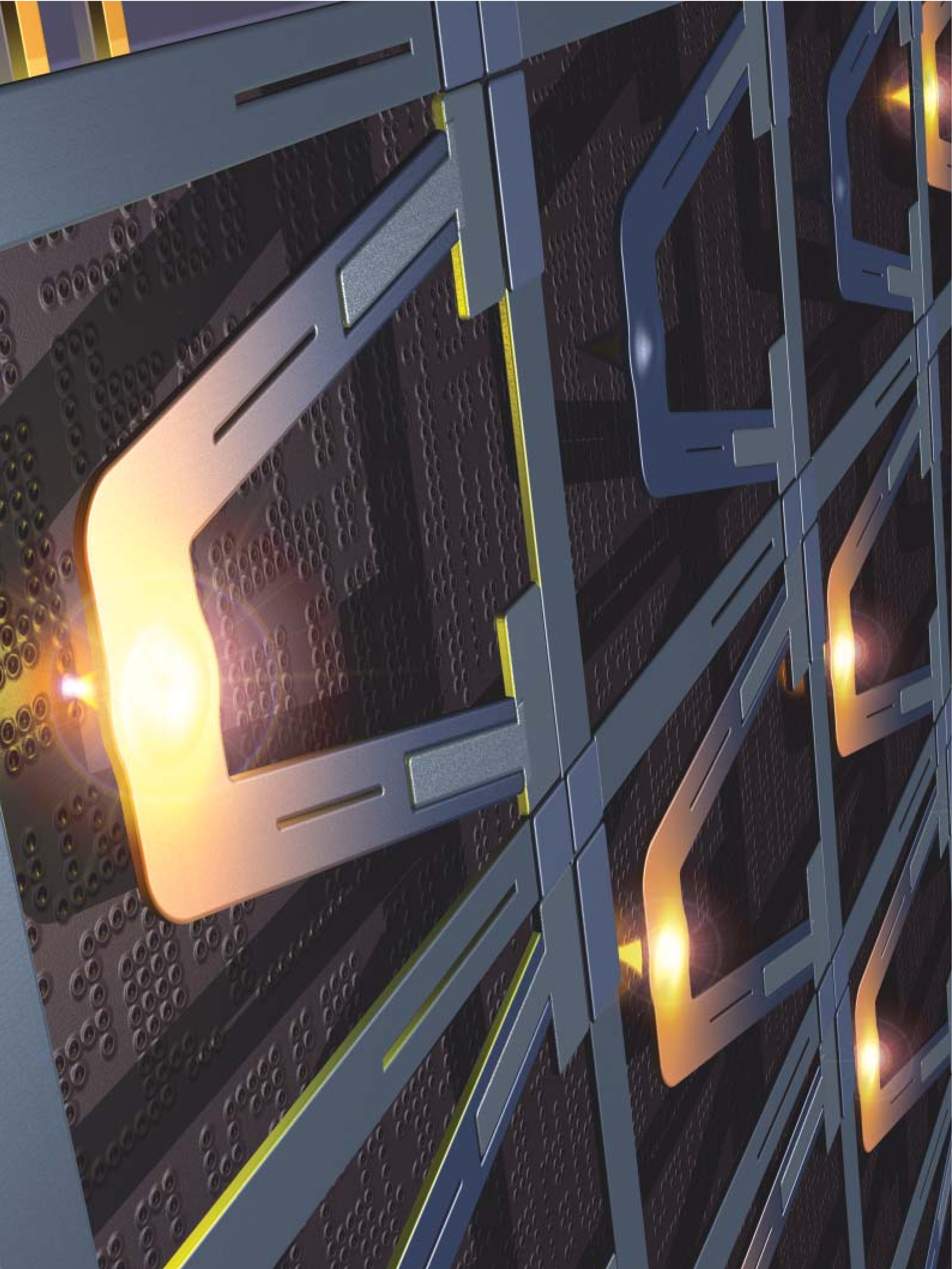
Mercer llamó a la presente situación "amenaza de desastre". El conocimiento de la historia glacial de la capa de hielo eurasiática sugiere que la amenaza no será crítica a menos que se diluyan las barreras de hielo actuales. No obstante, la investigación muestra con toda claridad que tal desastre tuvo lugar en el otro hemisferio en un pasado no tan distante. El mundo debe estar en guardia, por si se repitiese en el futuro.

Bibliografía complementaria

LATE WEICHSELIAN GLACIATION OF THE EURASIAN HIGH ARCTIC. M. J. Siegert, J. A. Dowdeswell y M. Melles, en *Quaternary Research*, vol. 52, págs. 273-285; 1999.

NUMERICAL MODELLING OF GLACIAL ISOSTASY AND ICE SHEET GROWTH WITHIN THE LATE WEICHSELIAN BARENTS SEA. D. Howell, M. J. Siegert y J. A. Dowdeswell, en *Journal of Quaternary Science*, vol. 15, págs. 475-486; 2000.

NEW CONSTRAINTS ON THE LIMITS OF THE BARENTS-KARA ICE SHEET DURING THE LAST GLACIAL MAXIMUM BASED ON BOREHOLE STRATIGRAPHY FROM THE PECHORA SEA. L. Polyak, V. Gataullin, O. Okuneva y V. Stelle, en *Geology*, vol. 28, págs. 611-614; 2000.





Nanounidades de memoria

Inventar un dispositivo nanotecnológico que se produzca industrialmente y les resulte útil a los consumidores es más complicado de lo que parece

Peter Vettiger y Gerd Binnig

Muchos ingenieros conocen la emoción de haber diseñado un producto nuevo que luego se utiliza por doquiera. Esperamos gozar dentro de tres años —creemos tener más de la mitad de las bazas a nuestro favor— un placer más raro: sacar a la venta un tipo de máquina del todo nuevo.

Se habla mucho de nanotecnología en estos tiempos, la nueva frontera donde los entresijos de las máquinas no miden más que unas milmillonésimas de metro. La investigación en sistemas microelectromecánicos (SMEM) —dispositivos de piezas móviles microscópicas fabricadas con las mismas técnicas con que se construyen los chips informáticos— ha armado un gran revuelo, pese a que no ofrece todavía muchos productos comerciales. Como podemos atestiguar, ya que hemos invertido hasta ahora seis años en uno de los primeros proyectos encaminados a crear un dispositivo nanomecánico que pueda fabricarse en masa, a escalas tan diminutas la ingeniería y la investigación científica se mezclan de modo inextricable. Obstáculos inesperados aparecen en el camino que media entre los experimentos que indagan principios fundamentales, los prototipos operativos y, en última instancia, un producto que se venda bien.

En IBM llamamos a nuestro proyecto Milpiés. Si seguimos por el buen camino, alrededor de 2005 se podrá comprar una tarjeta de memoria del tamaño de un sello de correos para la cámara digital o el reproductor portátil de MP3. No almacenará unas docenas de megabytes de vídeo o audio, como las típicas tarjetas de memoria "flash" (microcircuitos de memoria permanente), sino varios gigabytes —cantidad suficiente para guardar un buen número de CD musicales o varias películas—. Se podrán borrar y reescribir datos en ella. Será bastante rápida y gastará una cantidad moderada de energía. Un nombre oportuno para el nuevo dispositivo es "nanounidad de memoria".

No es que esta primera aplicación carezca de interés, pero tampoco cabe decir que vaya a cambiar el mundo. Ya hay en el mercado tarjetas de memoria "flash" con un gigabyte de capacidad. Si Milpiés impresiona, es por otra razón: porque guarda los datos digitales de forma diferente del método seguido por los discos duros magnéticos, los discos compactos ópticos y los chips de memoria que inscriben los datos por medio de transistores. Después de décadas de progreso espectacular, esas técnicas veteranas han enfilado su recta final; ante ellas se alzan imponentes limitaciones físicas.

Las primeras nanounidades, por el contrario, apenas rendirán una mínima parte de lo que llegarán a dar un día sus sucesoras; les quedan por delante décadas de mejora. Las

PISTAS DE GRABACION. Matrices de pestañas dotadas de puntas graban sobre una superficie de plástico millones de bits en un espacio sumamente pequeño.

SLIM FILMS

futuras generaciones de dispositivos de la familia de Milpiés, cabe esperar, escribirán, leerán y borrarán bits que irán menguando hasta no ser más que moléculas sueltas, átomos incluso. Al reducirse, las partes móviles de las nanounidades trabajarán con mayor rapidez y gastarán la energía con mejor rendimiento. La técnica Milpiés se aplicará en un principio, casi con toda seguridad, en dispositivos de almacenamiento de gran capacidad para cámaras, teléfonos móviles y otros dispositivos portátiles. Las tarjetas de las nanounidades funcionarán de la misma manera que las tarjetas de memoria "flash" en los aparatos actuales, pero ofrecerán una capacidad de varios gigabytes a un menor coste. Los milpiés quizá sean de gran utilidad para la ciencia de materiales o la biotecnología.

Ese largo futuro nos emocionó hace media docena de años. A lo largo del camino, aprendimos que a veces la única forma de rodear un obstáculo es un descubrimiento afortunado. Por suerte, además de obstáculos inesperados hay también regalos inesperados. Parecen a veces una recompensa de la naturaleza a quienes se atreven a explorar nuevos terrenos. Pero en otras ocasiones la naturaleza no es tan gentil y para dar con la respuesta sólo se cuenta con las propias luces. Hemos tenido que trabajar para superar esos problemas, pero el esfuerzo no ha sido excesivo. Si en una etapa no teníamos ni idea de cómo afrontar un problema, quizás un año después encontrábamos una respuesta. En esos casos en que se espera que se pueda resolver el problema aunque aún no se sepa cómo, una buena intuición es lo que hace falta.

Los autores

PETER VETTIGER y GERD BINNIG colaboran en la creación del proyecto de nanounidad de memoria Milpiés. Vettiger tiene una larga carrera dedicada a la microfabricación y nanofabricación. Se incorporó al Laboratorio de Investigación de IBM en Zúrich en 1963 y se graduó en 1965 en ingeniería electrónica por la Universidad de Zúrich de Ciencias Aplicadas. Su carrera académica culminó con un doctorado honorífico concedido en 2001 por la Universidad de Basilea. Binnig terminó su doctorado en física en 1978 en la Universidad Johann Wolfgang Goethe de Frankfurt y se incorporó al laboratorio de Zúrich ese mismo año. Recibió el Premio Nobel de Física de 1986 junto con Heinrich Rohrer por la invención del microscopio de barrido de efecto túnel.

Una idea disparatada

En cierto modo, Milpiés nació en un campo de fútbol. Jugábamos en el equipo del Laboratorio de Investigación de IBM en Zúrich, nuestro lugar de trabajo. Nos presentó otro compañero de equipo, Heinrich Rohrer. Trabajaba en el laboratorio de Zúrich desde 1963, como uno de nosotros (Vettiger); había colaborado con el otro (Binnig) en la creación del microscopio de barrido de efecto túnel (MBT) en 1981, instrumento que satisfizo un viejo deseo: ver y manipular átomos sueltos.

En 1996 buscábamos un nuevo proyecto en que embarcarnos. El ambiente había cambiado mucho. El principio de la década de 1990 fue difícil para IBM. Había liquidado su división de ciencia del láser, de la que Vettiger era uno de los directores. Binnig había cerrado su laboratorio satélite en Múnich y regresado a Zúrich. Junto con Rohrer, hicimos por ver de qué maneras cabría aplicar el MBT u otras técnicas de exploración por barrido, en concreto el microscopio de fuerza atómica (MFA), al mundo de puertas afuera de la ciencia.

El MFA, inventado por Binnig y desarrollado con Christoph Gerber, del laboratorio de Zúrich, y Calvin F. Quate, de la Universidad de Stanford, es la técnica de barrido local más utilizada. Como el MBT, el MFA se fundó en un método radicalmente nuevo en microscopía. En lugar de magnificar objetos por medio de lentes que guían haces de luz o de captar electrones que rebotan en el blanco, un MFA arrastra despacio sobre la superficie del objeto observado una minúscula pestaña, una especie de palanca, o la golpea con ella. La pieza lleva en su extremo una afilada punta, de menos de 20 nanómetros de ancho —unos cientos de átomos—. Cuando la pestaña pasa sobre los pozos y las crestas de la superficie (bien en contacto con ella, bien rozándola casi), un ordenador convierte su flexión en una imagen que, en los mejores casos, descubre cada átomo sobrevolado.

Mientras Binnig obtenía las primeras imágenes de átomos individuales de silicio a mitad de la década de 1980, sin querer dejó en una ocasión que la punta siguiese golpeando la superficie. Quedaron pequeñas marcas en el silicio. Saltaba a la vista que un MBT o un MFA valdrían para guardar datos a escala atómica: una marca sería un 1, su ausencia un 0. No obstante, las dificultades también estaban claras. La punta tiene que seguir el contorno del medio con procedimientos mecánicos; ésa es la razón de la lentitud del barrido en comparación con el veloz giro de un disco duro o los nanosegundos en que conmutan los transistores.

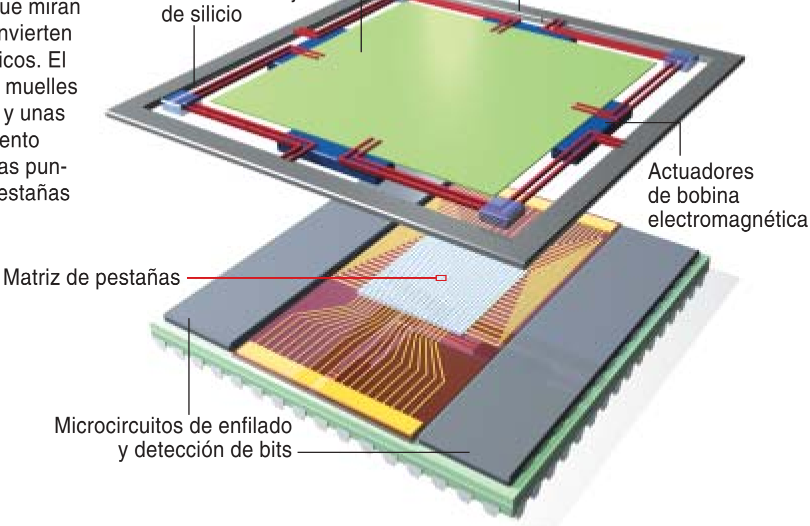
Pronto salieron a luz otros pros y contras. Debido a la masa pequeñísima de las pestañas, el funcionamiento del MFA cuando la punta entra en contacto directo con el medio es mucho más rápido que

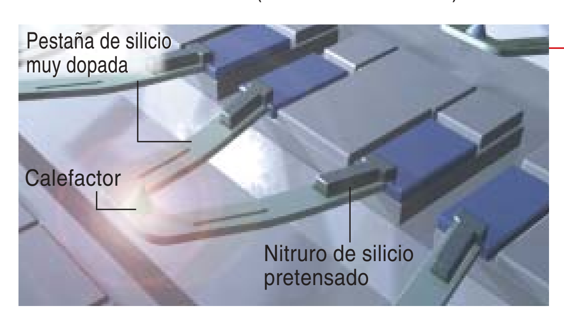
Resumen/*El proyecto Milpiés*

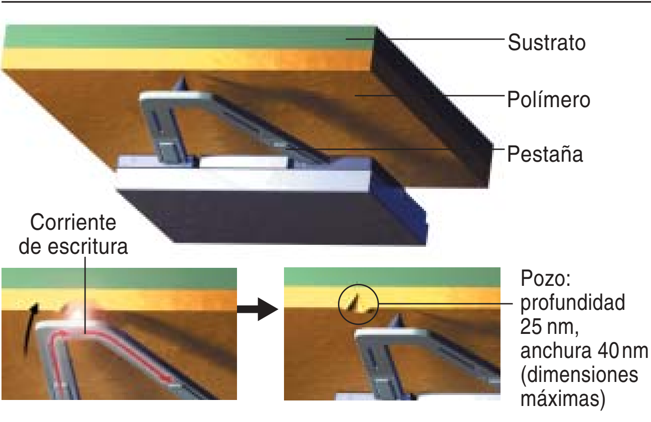
- Los actuales dispositivos de almacenamiento digital se aproximan a límites físicos que impedirán que sus capacidades aumenten. La nanounidad de memoria del proyecto Milpiés —un dispositivo micromecánico con componentes nanoscópicos— podría imponerse donde los otros no llegarán ya.
- Milpiés lee, escribe y borra datos en un medio polimérico con una matriz de pestañas o palancas diminutas. Para inscribir un uno digital, las puntas de las palancas marcan una depresión; la ausencia de muesca es un cero digital.
- Los primeros milpiés comerciales, con mucha probabilidad tarjetas de memoria del tamaño de un sello instaladas en aparatos electrónicos portátiles, deberían salir a la venta de aquí a tres años.

ASI FUNCIONA LA NANOUNIDAD DE MEMORIA

EL PROTOTIPO de nanounidad de memoria del proyecto Milpiés funciona como un diminuto fonógrafo. Las agujas de las nanoscópicas pestañas de silicio leen los datos inscritos en un medio polimérico. Una matriz de 4096 pestañas dispuestas reticularmente, dotadas de puntas que miran hacia arriba, está conectada a microcircuitos de control que convierten en ristras de bits la información codificada en los pozos analógicos. El polímero va suspendido de una plataforma de barrido por unos muelles de hoja de silicio; así, unos minúsculos imanes (no mostrados) y unas bobinas electromagnéticas desplazan el medio de almacenamiento a lo ancho de un plano, mientras lo mantienen nivelado sobre las puntas. Las puntas entran en contacto con el plástico porque las pestañas se flexionan hacia arriba (menos de una micra).



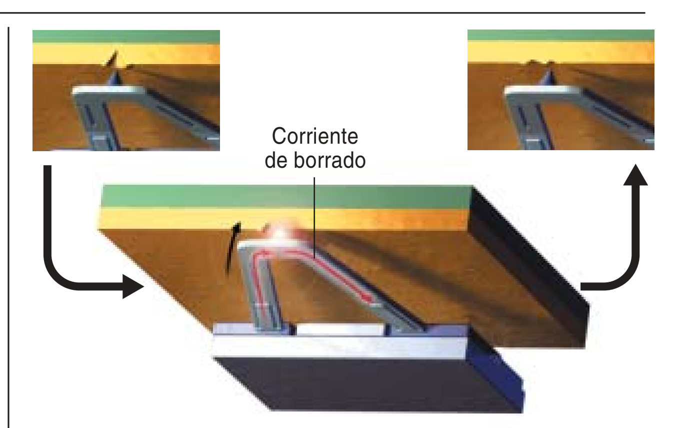






ESCRITURA DE UN BIT

Por medio del calor y de la fuerza mecánica, las puntas crean pozos cónicos en pistas lineales que representan series de "unos" digitales. Para producir un pozo, la corriente eléctrica circula a través de la pestaña; de esa forma se calienta una región dopada de silicio a 400 grados centígrados, que permite a la estructura pretensada del brazo flexionarse hasta hundir la punta en el polímero. La ausencia de pozo es un "cero".



BORRADO DE UN BIT

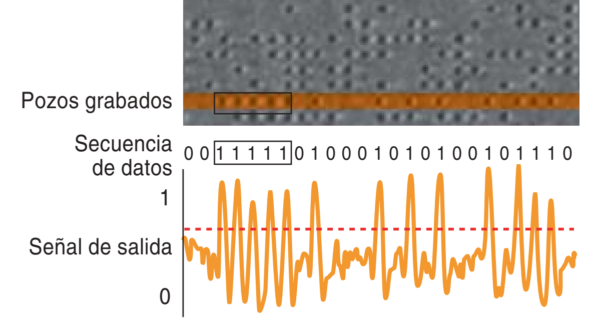
El último prototipo del proyecto Milpiés borra un bit existente calentando la punta a 400 grados centígrados y abriendo otro pozo justo al lado del pozo previamente grabado, que entonces se rellena (según se muestra). Otro método de borrado inserta la punta caliente en el pozo; el plástico recupera entonces su forma plana original.

LECTURA DE UN BIT

Para leer datos, las puntas se calientan primero hasta unos 300 grados centígrados. Cuando una punta de barrido encuentra un pozo y se introduce en él (*abajo*), transfiere calor al plástico. Así disminuyen su temperatura y su resistencia eléctrica, pero esta última sólo en una proporción mínima, alrededor de una parte en unos pocos miles. Un procesador digital de señal convierte esta señal de salida, o su ausencia, en una secuencia de datos (*derecha*).







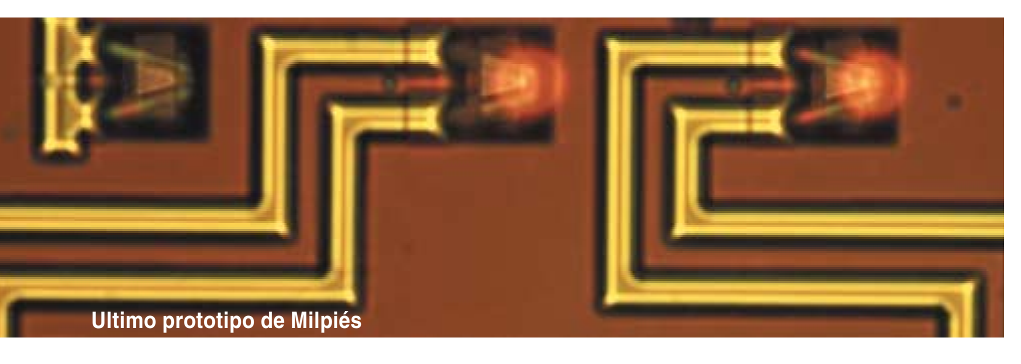
BRYAN CHRISTIE DESIGN

el de un MBT o un MFA sin contacto, aunque no tanto como el almacenamiento magnético. Por otro lado, las puntas de un MFA de contacto se desgastan rápidamente cuando barren superficies metálicas; y lo más importante: una vez la punta ha impreso una marca, no hay forma obvia de "borrarla".

Un grupo encabezado por Dan Rugar había probado en el centro de Investigación de Almaden de IBM, en San José, California, a disparar impulsos de láser sobre la punta, para calentarla; se ablandaba con eso el plástico y la punta podía marcarlo. Consiguieron así grabaciones, del estilo de las impresas en un disco compacto, que almacenaban datos con una densidad superior a la de los actuales discos de vídeo digital (DVD). También realizaron exhaustivas pruebas de desgaste, con resultados muy prometedores. Pero el sistema era demasiado lento; además, ni borraba ni reescribía.

Para empezar, necesitábamos al menos una forma de borrar, fuese o no elegante. Ya surgirían después, pensamos, otras soluciones. Desarrollamos un plan de borrado de grandes campos de bits. Los calentábamos por encima de la temperatura a la que el polímero comienza a fluir —como se alisa una superficie de cera cuando se la calienta con un soplador de aire caliente—. Funcionaba bien, pero tenía sus complicaciones: antes de borrar un campo, no quedaba más remedio que transferir a otro campo todos los datos que habían de conservarse. (Después, como explicaremos, la naturaleza ofreció un método mucho mejor.)

Con estas crudas ideas en mente, emprendimos nuestro proyecto multidisciplinar. Al trabajar los dos en un mismo equipo acoplamos dos departamentos de IBM, el de física y el de dispositivos (luego se fusionarían en un único departamento de ciencia y tecnología.) También se nos unieron Evangelos Eleftheriou y su equipo del departamento de sistemas de comunicaciones de nuestro laboratorio. Hoy colaboran con nosotros más grupos del departamento de investigación de IBM y de distintas universidades.


Ultimo prototipo de Milpiés

IBM

Nuestro equipo esbozó un diseño que, creíamos, proporcionaría las características que faltaban. En lugar de usar una sola pestaña, ¿por qué no aprovechar la capacidad de los fabricantes de chips de construir miles, millones de piezas microscópicas idénticas en una oblea de silicio del tamaño de una uña? Un ejército de lentas puntas de MFA que trabajasen en paralelo —como las patas de un milpiés— podría leer o escribir datos con bastante rapidez.

Ahí hizo falta más imaginación para prever una oportunidad de éxito que para concebir la idea misma. No siempre resulta fácil arreglárselas ni siquiera con un solo MFA, y sin embargo confiábamos en que un dispositivo que recurría al paralelismo masivo, cargado de puntas, funcionaría fiablemente.

Cuando se produce el encuentro de diferentes costumbres no se pueden evitar los malentendidos, al menos no al principio. Nos hemos beneficiado muchísimo, no obstante, de la mezcla de puntos de vista dispares.

La brega

No éramos expertos en SMEM. Quienes se dedicaban a los SMEM o trabajaban en la exploración por barrido habían considerado, hasta ese momento, descabellado nuestro proyecto. Aunque otros, por ejemplo el grupo de Quate en Stanford, estudiaban en esa época el almacenamiento de datos mediante MBT o MFA, nuestro proyecto era el único que pretendía integrar a gran escala multitud de sondas. Esperábamos que, si presentábamos un prototipo operativo en la undécima Reunión Internacional del IEEE (el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) sobre Sistemas Microelectromecánicos, que se iba a celebrar en enero de 1998 en Heidelberg, se nos devolvería el honor. Nos tuvimos que conformar con un prototipo casi operativo, una matriz de puntas de cinco-por-cinco inserta en un área de 25 milímetros cuadrados.

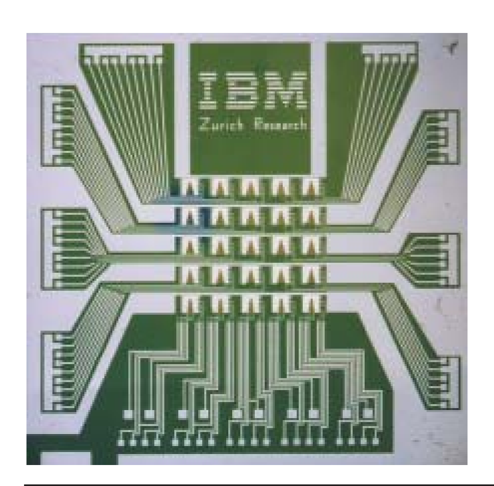
Esta estructura de funcionamiento en paralelo atinó a tomar imágenes, pero no a escribir. Habíamos ignorado un detalle técnico, insignificante pero fundamental: los hilos que conducían hasta los calefactores eran metálicos, demasiado finos para soportar la corriente que pasaba por ellos. Se fundieron inmediatamente, como fusibles sobrecargados, debido a la electromigración en películas metálicas. Sobre electromigración había escritos suficientes; debíamos haber conocido su existencia. Este no fue nuestro único error, pero en nuestro grupo se admiten y corrigen rápidamente los fallos.

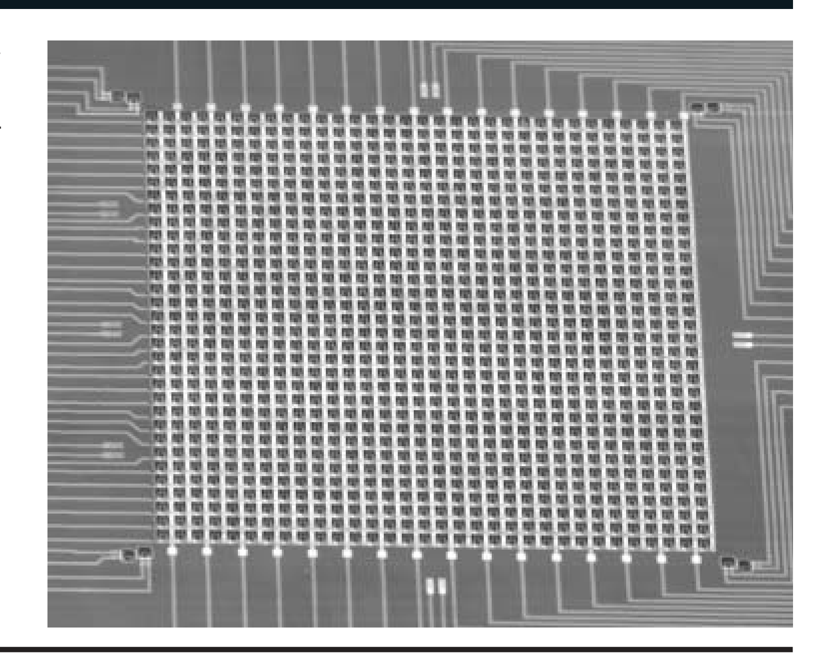
A pesar de los contratiempos, los directores de nuestro laboratorio detectaron un progreso real. Nos permitieron doblar el tamaño del equipo; ahora comprendía ocho personas. El dispositivo de las 25 puntas nos había enseñado que teníamos que sustituir las conexiones de aluminio; en su lugar pusimos pestañas de silicio muy dopado. También descubrimos que era posible estabilizar la matriz de puntas bajo el medio de almacenamiento con gran precisión en un área grande. Nos dio tanta confianza, que adoptamos una matriz mayor sin más dilación.

Vettiger advirtió un grave problema en mayo de 1998, mientras daba una charla en el Laboratorio de Almaden de IBM. Exponía cómo se dispondrían las pestañas en filas y columnas regulares, conectada cada una a una rejilla de hilos eléctricos. Pero cuando quiso explicar

MAS PUNTAS EN MENOS ESPACIO

EVOLUCIÓN DEL PROTOTIPO: El chip milpiés de primera generación contenía una matriz de 25 palancas en un cuadrado de cinco milímetros de lado (*abajo*). El siguiente prototipo (*derecha*) incorporaba 1024 palancas en un cuadrado de tres milímetros.





cómo funcionaría este sistema, de pronto se dio cuenta de que de ninguna manera lo haría. Nada detendría la inmediata circulación de corriente eléctrica hacia todas partes; no habría forma, pues, de enviar una señal a una palanca concreta.

El flujo incontrolado de corriente no es un fenómeno desconocido cuando las unidades de una matriz se tienen que direccionar por filas y columnas. Una solución habitual consiste en conectar un conmutador transistor a cada unidad. Pero no nos era posible colocar los transistores en el mismo chip que las puntas; las puntas se afilan bajo un intenso calor, que destruiría los diminutos transistores. De nuevo en el laboratorio, probamos toda clase de trucos para mejorar el control del flujo de corriente, ninguno de los cuales satisfizo a Vettiger. Cuanto mayor era la matriz, más importante se volvía este defecto. Un rápido cálculo y simulación por parte de Urs Dürig, integrante de nuestro equipo, mostró que para una matriz de 1000 unidades aún sería posible direccionar palancas individuales para la escritura; la lectura de las pequeñas señales de cada pestaña, sin embargo, fracasaría.

Vettiger apenas durmió esa noche. El equipo estaba a punto de terminar el diseño del chip de una matriz de 1024 puntas. Vettiger les dijo que esperasen. Durante días el equipo peleó con el problema, hasta que por fin Vettiger y Michel Despont dieron con una respuesta práctica: instalar un diodo Schottky (una vía eléctrica de un solo sentido) al lado de cada palanca. Este dispositivo, con su fuerte no linealidad, impediría que la corriente no deseada circulase hacia las demás pestañas. Reformamos el diseño y pronto dispusimos de nuestro segundo prototipo, una matriz de 32 por 32 puntas.

Este prototipo demostró la validez de nuestro empeño. La totalidad de las 1024 palancas salieron indemnes de la prueba. Se doblaban justo en la medida en que debían, de manera que aplicaban la fuerza correcta cuando se acoplaban a un medio de polímero blando llamado PMMA, que iba montado sobre un chip aparte, la plataforma de barrido. Unas bobinas electromagnéticas de cobre colocadas detrás de la plataforma de barrido lograron que la superficie de PMMA no se ladease demasiado cuando se desplazaba hacia la izquierda y hacia la derecha, hacia delante y hacia atrás sobre las puntas de las palancas. (Un nuevo explorador de barrido diseñado por Mark Lantz y Hugo Rothuizen ha reducido desde entonces la sensibilidad a la vibración, que constituía un problema.) Cada palanca de 50 micras de longitud tenía una pequeña resistencia en su extremo. Un impulso eléctrico enviado a través de la punta calentaba ésta hasta alrededor de 400 grados centígrados durante unos pocos microsegundos.

Los resultados iniciales de nuestro segundo prototipo fueron prometedores. Más del 80 por ciento de las 1024 pestañas funcionaron correctamente en el primer pase, y sólo hubo una estrecha zona "oscura" a lo largo del centro del campo de almacenamiento, que se produjo porque el chip se deformó al montarlo. Ni en sueños esperábamos tal éxito en tan temprana etapa del proyecto.

De la I al D

En el dispositivo de cinco por cinco, cada pestaña tenía en su base un sensor piezorresistivo que convertía la tensión mecánica en un cambio de resistencia; de esa forma el sistema detectaba cuándo había caído la punta en un pozo —un 1 digital—. Investigamos métodos que encontraran pozos de una forma más concluyente. Probamos con diodos Schottky integrados en las pestañas, con la esperanza de

IBM

que la tensión mecánica modificase su resistencia. Los diodos no exhibieron las propiedades esperadas; no sabíamos por qué. No obstante, cuando se detectaba un bit observábamos una fuerte señal. Por fin hallamos la razón: un fenómeno térmico. Si la pestaña se calienta previamente a 300 grados centígrados —menos de lo necesario para que se inscriba una muesca—, su resistencia eléctrica disminuirá mucho en cuanto la punta caiga en el pozo. Nunca se nos habría ocurrido usar un efecto térmico para medir un desplazamiento, una flexión o una posición. A escala macroscópica sería demasiado lento y poco fiable debido a la convección —movimiento circulatorio en un medio fluido, en este caso el aire, cuando el calor se transfiere entre dos objetos de diferente temperatura—. A escala microscópica, sin embargo, no existe la turbulencia; los objetos más fríos o más calientes alcanzan el equilibrio en unos microsegundos.

Este resultado, inesperado, resultó muy útil. Ahora podíamos valernos del mismo calefactor en cada palanca tanto para leer bits como para escribirlos. En lugar de tres o cuatro hilos por palanca, bastaban dos.

Presentamos este segundo prototipo en el congreso del IEEE sobre SMEM de 1999. Esta vez, los asistentes quedaron más impresionados. Pero lo que realmente llamó la atención de los directivos de IBM fueron las imágenes de filas regulares de pozos que el milpiés había escrito en el polímero. Los pozos estaban separados sólo 40 nanómetros: unas 30 veces la densidad de las mejores unidades de disco duro del mercado.

Poco después, a principios de 2000, el proyecto Milpiés cambió de carácter. Nos centramos en crear el prototipo de un sistema de almacenamiento. El equipo creció hasta contar con una docena de investigadores. De nuevo fusionamos dos departamentos. Ahora se nos unían Eleftheriou y su equipo. Contribuían con su excepcional experiencia en la técnica de grabación de canales, que habían estado aplicando con gran éxito a la grabación magnética. Desarrollaron la parte electrónica del prototipo de un sistema totalmente operativo, desde el tratamiento básico de señales y la codificación de la corrección de errores hasta la arquitectura y el control completos del sistema.

Acabábamos de descubrir una forma de borrar un área pequeña; en cooperación con Eleftheriou, pudimos incluso convertirla en un sistema que antes de reescribir no tenía que borrar. En el nuevo método de borrado local, cuando la temperatura de la punta ablanda el material, el pedazo de medio hundido, el pozo, salta hacia arriba de nuevo a causa de la tensión superficial y la elasticidad del material. En vez de recocer un campo mayor mediante un calefactor integrado en el sustrato de almacenamiento —como en el método de borrado en bloque descrito antes—, la punta calienta localmente el medio. No se puede evitar que la punta ejerza cierta fuerza de origen electrostático. Así, cuando la punta se calienta hasta una temperatura suficientemente alta y se produce una nueva muesca, se borran los viejos bits de las proximidades. Si se escribe una densa fila de pozos, cada bit creado recientemente eliminará a su predecesor; sólo permanecerá el último bit de la fila. Este mecanismo vale incluso para sobreescribir datos antiguos con un nuevo código sin conocer cuál era el antiguo. Al unir nuestra experiencia en física con la destreza de Eleftheriou en canales de grabación, elaboramos una forma especial de codificación restringida para esta sobreescritura directa.

En ese punto estaba claro que el equipo necesitaba trabajar en la velocidad y el rendimiento energético de los milpiés. Teníamos que comenzar a medir relaciones señal-ruido, cocientes de error de bits y otros indicadores que informasen sobre lo bien que podría grabar datos digitales la nanounidad, para la que también teníamos que escoger tamaño y forma. El "factor forma" puede ser de máxima importancia en el mercado de la electrónica de consumo, específicamente en el área de dispositivos móviles que habíamos escogido como primer objetivo.


Prototipo de tercera generación

IBM

El camino por delante

En los últimos meses de 2002 nuestro grupo dio los toques finales al prototipo de tercera generación, dotado de 4096 palancas dispuestas en una matriz de 64 por 64 y 6,4 milímetros de lado. Embutir más pestañas en un chip es factible. Hoy podríamos fabricar chips con un millón de pestañas; de una oblea ordinaria de silicio, de 200 milímetros, saldrían 250 de estas matrices. Ahora la principal tarea es conseguir el equilibrio correcto entre dos objetivos. En primer lugar, nuestro diseño para un sistema de nanounidad de memoria completo —no sólo la matriz y la plataforma de barrido, sino también la microelectrónica integrada que los controla— debería resultar tan barato, que fuese inmediatamente competitivo, en especial para los dispositivos de mano, que funcionan con poco consumo. Pero es fundamental también que el sistema opere fiablemente a pesar de los daños que sufra tras años de utilización.

Hemos encontrado polímeros que se portan incluso mejor que el PMMA. En estos plásticos parece que los pozos son estables durante al menos tres años; un punto en la matriz se puede escribir y borrar 100.000 veces o más. Pero no estamos tan seguros del estado de las puntas después de hacer quizá cien mil millones de muescas durante varios años de funcionamiento. Dürig

y Bernd Gotsmann, de nuestro equipo, se proponen, en colaboración con compañeros del Laboratorio de Almaden de IBM, modificar los polímeros existentes o crear otros nuevos que cumplan los requisitos de nuestro sistema de almacenamiento.

Aunque el ojo humano reconoce con facilidad cuando barre una imagen del medio de un milpiés qué bloques de la rejilla contienen pozos y cuáles no, dista de ser trivial el diseño de circuitos electrónicos sencillos que ejecuten esa misma tarea con una precisión casi perfecta. Dar con los bits que representan ceros y los que representan unos es mucho más fácil, si todos los pozos tienen la misma profundidad y se hallan igualmente espaciados a lo largo de pistas rectas. Para ello debe construirse plana la plataforma de barrido, debe mantenérsela paralela a las puntas y debe desplazársela con velocidad constante y movimiento lineal —dentro de una tolerancia de sólo unos nanómetros—. Muy recientemente, hemos descubierto que al suspender la plataforma de barrido de finos muelles de hoja de silicio obtenemos un control mucho mejor del movimiento. Aun así, añadiremos un sistema de realimentación activa, muy sensible a la posición relativa de las dos partes; satisfará esas tolerancias nanoscópicas mientras el dispositivo se balancea en la cintura de alguien que ha salido a correr.

Cualquier sistema mecánico que, como el milpiés, genere calor tendrá que vérselas con la dilatación térmica. Bastará una diferencia de temperatura de algo más de un grado entre el polímero y las palancas de silicio, para que el alineamiento de los bits no se corresponda con el de las puntas. Un sistema de realimentación que compensara la desalineación añadiría complejidad y, con ella, costes. ¿Cuál es la mejor solución a este problema?

Por fortuna, la naturaleza nos ha ayudado de nuevo. Tanto el milpiés como el sustrato de almacenamiento portador de la película de polímero son de silicio; por lo tanto, se dilatarán por igual si ambos se encuentran a la misma temperatura. Además, la separación entre la matriz de puntas y el sustrato es tan pequeña, que el aire atrapado entre ambos componentes actuará como un excelente conductor de calor y a duras penas llegará a haber diferencias de temperatura entre ambos.

Debido a que el proyecto ha madurado ahora hasta el punto de que podemos dar ya los primeros pasos hacia el desarrollo del producto, nuestro equipo ha incorporado a Thomas R. Albrecht, del Laboratorio de Almaden; participó en que el Microdrive de IBM llegase al mercado. Llevar Microdrive desde el laboratorio hasta el consumidor fue una singladura similar a la que tendrá que afrontar quizá Milpiés en los próximos años.

Para los miembros de nuestro grupo, esta transición hacia el desarrollo del producto significa que tendremos que ir dejando Milpiés cada vez más en manos de otros. Los pasos atrás son la parte más difícil y, al mismo tiempo, de la que más depende el éxito de un proyecto.

Aún no podemos estar realmente seguros de que los milpiés lleguen un día a ser dispositivos comerciales. Como científicos ya no los consideramos un proyecto de alto riesgo, pero todavía nos regocijamos cuando un prototipo nuevo funciona. Si tenemos suerte, nuestros más recientes prototipos revelarán problemas que nuestro equipo sabe cómo resolver.

En cualquier caso, nos emociona que, al menos, gracias a esta técnica nanomecánica los investigadores puedan barrer un centímetro cuadrado con una resolución casi atómica. Hasta ahora el proyecto ha generado cerca de 30 patentes hasta cierto punto de fundamentos. ¡Quién sabe si las nanounidades llegarán a comercializarse! En cualquier caso, se tratará de un nuevo tipo de máquina que valdrá para algo. Eso sólo ya valdría la pena.

Proyectos de memorias de alta densidad

EL PROYECTO MILPIES DE IBM es sólo uno más entre otros encaminados a sacar a la venta memorias de ordenador de tamaño muy reducido y alta capacidad.

FIRMA	TECNICA DEL DISPOSITIVO	CAPACIDAD DE MEMORIA	COMERCIALIZACION
Hewlett-Packard Palo Alto, EE.UU.	Dispositivo de microscopio de fuerza atómica (MFA) del tamaño de una uña que se vale de haces de electrones para leer y escribir datos sobre la zona de grabación	Al menos un gigabyte (GB) de partida	Fin de la década
Hitachi Tokio, Japón	Dispositivo basado en un MFA; no se han revelado detalles	No se ha revelado	No se ha revelado
Nanochip Oakland, EE.UU.	Matrices de palancas con puntas de MFA que almacenan datos en un chip de silicio	En principio medio GB; potencial para 50 GB	Previsto para 2004
Royal Philips Electronics Eindhoven, Holanda	Sistema óptico similar a los CD regrabables que utiliza un láser azul para grabar y leer datos en un disco de tres centímetros de diámetro	Hasta un GB por cada cara, quizá cuatro GB en total	Previsto para 2004
Seagate Technology Scotts Valley, EE.UU.	Sistema reescribible que usa un MFA u otro método en un chip de un centímetro	Hasta 10 GB en un chip para portátiles	Previsto para 2006 o después

RECOPILADO POR TARIQ MALIK

Bibliografía complementaria

IN TOUCH WITH ATOMS. Gerd Binnig y Heinrich Rohrer en *Reviews of Modern Physics*, vol. 71, n.º 2, páginas S324-S330; marzo, 1999.

THE "MILLIPEDE"—NANOTECHNOLOGY ENTERING DATA STORAGE. P. Vettiger, G. Cross, M. Despont, U. Drechsler, U. Dürig, B. Gotsmann, W. Häberle, M. A. Lantz, H. E. Rothuizen, R. Stutz y G. Binnig en *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol. 1, n.º 1, páginas 39-55; marzo, 2002.

ENTREVISTA

John Rennie

Diálogo con James Watson en el cincuentenario del descubrimiento de la doble hélice

"No se nos escapa que el emparejamiento específico que hemos postulado sugiere de inmediato un posible mecanismo de copia del material genético", así reza uno de los pronunciamientos más famosos de la historia de la ciencia. James D. Watson y Francis H. C. Crick lo estamparon en su artículo del 2 de abril de 1953 en *Nature*, donde proponían el modelo de doble hélice para la estructura del ADN, hito que transformó el campo de la biología molecular y la genética. Para conmemorar el L aniversario de la doble hélice, el redactor jefe de *Scientific American*, John Rennie, ha entrevistado a Watson en su despacho del Laboratorio de Cold Spring Harbor, que ha dirigido durante 25 años. Watson reflexiona sobre el descubrimiento de la doble hélice, el estado actual de las ciencias genéticas y las controversias que la envuelven. (Crick, por problemas de salud, no pudo participar.) La conversación se desarrolló en los términos siguientes.

SCIENTIFIC AMERICAN: El ADN ha trascendido el ámbito restringido de la ciencia para convertirse en un gran fenómeno cultural, una metáfora de nuestras naturalezas. Forma parte de nuestras conversaciones cotidianas, del arte. Cuando usted trabajaba sobre la doble hélice, ¿preveía que el ADN llegaría a ser tan conocido?



MIKE MEDICINE HORSE *Hybrid Medical Animation*

JAMES WATSON: No, no podíamos preverlo. Es que nunca se había secuenciado o amplificado el ADN.

El famoso inmunólogo australiano [Sir Frank Macfarlane] Burnet publicó aquel artículo en una revista de medicina que salió en 1961 o en el 62 —resultó estar totalmente equivocado— en el que decía que el ADN y la biología molecular no tendrían influencia en la medicina. Porque eso sólo es posible si se puede leer el ADN. De ahí la importancia enorme del Proyecto Genoma Humano.

Volviendo a 1953, todo lo que queríamos era hallar cómo el ADN proporciona la información y cuál era la maquinaria celular de fabricación de proteínas. Y eso es todo, en realidad; no pensamos en la terapia génica. Pasaron 15 años hasta que empezara a plantearse la cuestión, hacia 1968, una vez que aparecieron las enzimas de restricción y —poco después— la secuenciación del ADN.

SA: Usted ha afirmado que se involucró en la investigación sobre el ADN debido a su interés en la evolución y la información.

JW: [El físico Ervin] Schrödinger probablemente no fue el primero, pero sí al primero que yo leí que dijera que debía existir un código de alguna clase que permitiera a las moléculas de las células transmitir información.

Para cuando salió su libro [*What is Life?* (1944)], algunos, como [el biólogo J. B. S.] Haldane, iban estableciendo la conexión entre los genes y las proteínas. Por aquel entonces la secuencia de aminoácidos de las proteínas nos era desconocida. Se sabía que existía alguna secuencia, nada más. Sólo cuando nosotros obtuvimos la estructura del ADN y [el químico Frederick] Sanger secuenció el primer polipéptido se pudo cantar victoria.

SA: ¿Así que usted diría que en su trabajo le movía más el atractivo de esa idea que la ambición?

JW: Soy curioso por naturaleza. Antes leería historia económica que historia, por ejemplo, porque me gustan las explicaciones. De modo que si se desea una explicación para la vida, tenía que ser lo que constituyera la base molecular de la vida. Nunca pensé que hubiera una base espiritual de la vida; tuve mucha suerte de ser educado por un padre sin fe. No tuve ligaduras. Mi madre era católica de nombre, nada más.

SA: Rememorando la carrera hacia la doble hélice, es obvio que determinadas personalidades influyeron profundamente en los detalles de quién fue el primero en encontrarla y cómo. Además, el descubrimiento en aquel preciso momento también parecía inevitable. Había tantos tan cerca —ustedes, Linus Pauling, Maurice Wilkins y Rosalind Franklin. Dar con la estructura parecía irremediable.

JW: Lo era si se tenían los datos de cristalografía de rayos X y todo lo demás, pero... Linus Pauling podría haber dado con la hélice alfa sin haber visto nunca la fotografía de King's College.

SA: Por tanto, si usted y Francis no hubieran hecho el descubrimiento entonces...

JW: No creo que hubiera pasado ni un año. No sabíamos que a finales de febrero Rosalind Franklin había sacado la forma B porque se marchaba del King's College. A ella no la conocimos entonces. Ni siquiera sabía de su resultado cuando escribí *The Double Helix*.

SA: Siempre ha existido la controversia porque Maurice Wilkins le había enseñado a usted las imágenes cristalográficas de Rosalind Franklin sin permiso de ésta, y eso les pudo proporcionar a Francis y a usted una pista importante.

JW: Se ha dicho: ¿Por qué no habló usted luego con Rosalind, y le agradeció haber visto la fotografía? Ella no quería hablar de eso. No quería hablar de eso con los colaboradores.

Próxima a su muerte, se vio con Francis, y eso pudo haber sido una ocasión para recapitular el pasado, pero ella sólo estaba "ilusionada con el futuro". Se había perdido aquélla; quería conseguir la siguiente.

SA: Volviendo atrás, ¿hubiera sido más apropiado que le hubieran otorgado

a ella el Nobel, junto con usted y Francis, en vez de a Maurice Wilkins?

JW: No creo. Wilkins nos dio la fotografía cristalográfica de la forma A y ella nos dio la de la forma B. Podría decirse que en una sociedad perfecta e ideal, a ellos les hubieran dado el premio de química y a Crick y a mí el de biología. Eso hubiera sido una manera elegante de reconocimiento para nosotros cuatro. Pero a nadie se le ocurrió.

En aquella mañana de sábado [el 28 de febrero de 1953] propusimos un modelo que no estábamos seguros de que fuera correcto. Habíamos pensado que los datos de rayos X serían muy concluyentes para que la gente lo creyera. Porque [el modelo tenía] un mecanismo de copia del que todos los biólogos deseaban convencerse independientemente de los datos de rayos X.

SA: Porque la complementariedad de las bases del nucleótido permitiría que la estructura en doble hélice realizara copias de sí misma.

JW: Pensábamos que sólo íbamos a llegar a mitad de camino, ¿sabe? Una propuesta de la estructura, y que luego tendrían que comprobar la estructura, y entonces podría uno preguntarse cómo se copiaba.

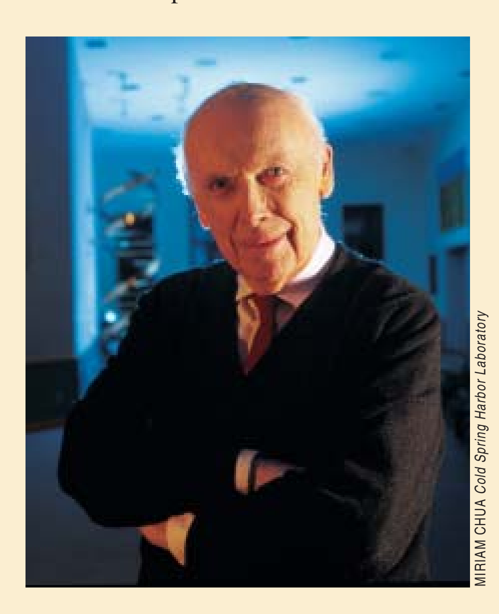
Somos famosos porque el ADN es muy famoso. Si Rosalind hubiera hablado con Francis desde 1951, y compartido sus datos con él, ella hubiera resuelto esa estructura. Y entonces ella hubiera sido la famosa.

SA: En un siglo en que hemos ido desde el redescubrimiento de las leyes de Mendel y la identificación de los cromosomas como agentes de la herencia hasta descifrar casi completamente el genoma humano, el descubrimiento de la doble hélice cae justo en medio. Con respecto al ADN, ¿cuánto nos queda por hacer? Llegados a este punto, ¿quedan pendientes todavía grandes descubrimientos o sólo cabe bordar los pequeños detalles?

JW: El principal problema, creo yo, es la cromatina [el complejo de proteínas histonas que encierra el ADN en un cromosoma, y que controla su enrollamiento y desenrollamiento]. ¿Qué es lo que determina si un trozo particular de ADN en una zona del cromosoma está funcionando, hallándose como se halla recubierto por histonas? ¿Qué ocurre en el nivel de metilación y de epigénesis? Se puede heredar algo, aparte de la secuencia de ADN. Ahí es donde se esconde ahora el interés de la genética.

Y parece que avanzamos bastante rápido. No es que quiera ser profeta, pero me parece que en los próximos diez años el asunto ya quedará claro. Hay gente muy buena trabajando sobre ello. Contamos con los medios. Llegará el momento en que los principios básicos de la genética se conocerán en términos de funcionamiento de genes, y seremos capaces de aplicar más eso a cuestiones como la función cerebral.

SA: El ARN también se ha salido de la sombra del ADN. Ahora conocemos fenómenos como las interferencias de ARN, en los cuales las moléculas de ARN pueden neutralizar genes. ¿Están aún por dilucidar las complejidades de la dinámica del ARN? ¿Es eso comparable con el problema de las histonas?


MIRIAM CHUA *Cold Spring Harbor Laboratory*

JW: Sí, es mucho más complejo de lo que pensábamos en 1953. Creíamos que sólo existía una forma de ARN. Mas para elaborar el ARN, hay que modificar las histonas. Me parece que todo acaba en lo mismo: en la cromatina.

SA: En un número reciente de *Nature*, Wally Gilbert afirma que "la biología molecular está muerta", en gran parte porque su objeto, el ADN, ha quedado subsumido en los demás campos.

JW: Estoy de acuerdo con él, en el sentido de que se ha convertido en una herramienta. Todo sale del ADN. Se puede decir que se está estudiando el ADN en el comportamiento de los canarios o que se está estudiando el comportamiento de los canarios. ¡A mí me parece que estudiamos el comportamiento de los canarios!

Quedan aún algunos problemas relevantes que resolver sobre el almacenamiento de la información y su recuperación y utilización en el cerebro. Es un problema mayor que el del ADN, y más difícil.

SA: Si usted empezara a investigar ahora...

JW: Trabajaría en algo sobre las conexiones entre genes y comportamiento. Se pueden encontrar genes del comportamiento, pero eso no explica cómo funciona el cerebro. Mi primer interés científico fueron las migraciones de las aves. Hasta que no se conozca el funcionamiento del cerebro de las aves, no se podrá saber cómo los genes les indican a dónde viajar. Porque, claro, ¡la madre no le dice al pequeño a dónde ir! Se trata, por tanto, de algo congénito.

Hay otras muchas cosas sobre el comportamiento [que quedan por resolver]. Algunos se asombran de que a los hombres puedan gustarles los hombres, pero para mí ¡es tan misterioso como que a los hombres les gusten las mujeres!

Estas cosas son tan difíciles... Francis insiste en que la investigación sobre el cerebro no tiene [el equivalente a] la molécula de ADN. No tiene algo central de lo cual se desprenda todo lo demás.

SA: ¿O sea que no tiene ninguna opinión sobre si es probable que alguien encuentre pronto algo así?

JW: No. Los jóvenes que se adentran por esa vía proceden con la esperanza de que ocurra mientras todavía sean jóvenes. Y les gustaría ser partícipes de eso. Intentan escoger una cuestión con la que participar en el descubrimiento, pero no El Gran Descubrimiento.

SA: Tiene usted fama de no morderse la lengua, y le critican por ello. ¿Ha dicho algo de lo que tenga que arrepentirse?

JW: De vez en cuando. A veces he dicho cosas y luego la gente me ha dicho: "¿Es que tenías que decir aquello?", porque parecía cruel. Y sí, hice cosas así. Pero cuando nadie dice que no estamos yendo a ningún lado, alguien tiene que decirlo. Mi objetivo siempre ha sido mejorar las instituciones lo más posible.

Me parece que tengo esa misma debilidad que queda tan patente en [el tenista] John McEnroe. ¡No me puedo quedar sentado mientras la gente dice tonterías en una reunión sin decir que son tonterías!

Lagos antárticos

El plancton

La Antártida, uno de los sitios más fascinantes de la Tierra, constituye, al propio tiempo, un continente bastante desconocido. Pese a su carácter aparentemente inhóspito, bulle allí la vida en el mar y tierra firme.

Las aves y mamíferos marinos, que dominan la macrofauna de las zonas costeras, están adaptados a las condiciones extremas de los intensos fríos polares. Además de estos grandes vertebrados, existe una sorprendente diversidad de organismos microscópicos, que presentan también adaptaciones fisiológicas a su entorno helado.

Gran parte del continente se halla permanentemente cubierto por una gruesa capa de hielo. Sin embargo, durante el verano austral el hielo que cubre algunas áreas costeras se derrite, dejando al descubierto cuerpos de agua dulce: lagos y lagunas. Nueve meses han pasado bajo la manta de hielo, en cuyo intervalo disminuye drásticamente la penetración de la luz en la columna de agua, con el freno consiguiente del proceso de fotosíntesis y, por ende, de la producción primaria. Pero con el verano, descongelada la capa de hielo, se aceleran los procesos metabólicos del ecosistema.

El fitoplancton, las algas microscópicas que viven en suspensión en el agua, son las responsables de la producción primaria. En él dominan las formas pequeñas. El picoplancton, que agrupa a los organismos que no superan las 2 micras de tamaño, se halla representado, sobre todo, por cianobacterias cocoides de los géneros *Synechocystis* y *Synechococcus*, mientras que el nanoplancton, cuya talla se mueve entre dos y 20 micras, lo componen principalmente formas flageladas. Pertenecen al nanoplancton de los lagos antárticos los géneros *Chlamydomonas*, *Ochromonas* o *Cryptomonas*.

En la fracción heterotrófica planctónica hallamos bacterias (picoplancton heterotrófico), pequeños flagelados (nanoflagelados heterotróficos), ciliados de diversos tamaños y sólo dos especies de crustáceos.

Las interacciones tróficas (alimentarias) entre los distintos componentes del ecosistema crean verdaderas "tramas tróficas". Los predadores suelen alimentarse de presas más pequeñas que ellos mismos. Así, los nanoflagelados fagocitan picoplancton, los ciliados de mayor tamaño organismos nanoplanctónicos, mientras que los copépodos pueden ingerir tanto rotíferos y ciliados, como algas y flagelados nanoplanctónicos.

Además de las rigurosas condiciones climáticas reinantes en los lagos antárticos, se distinguen éstos por la ausencia absoluta de peces que se alimenten del zooplancton. Nos encontramos, pues, ante unas redes tróficas muy simples. Tampoco aparecen larvas de insectos que, en latitudes más bajas, suelen predar sobre el plancton o el epiliton (organismos microscópicos que viven adheridos a las rocas).

Por lo tanto, los únicos crustáceos planctónicos que habitan estas latitudes, el copépodo calanoideo *Boeckella poppei* y el anostraco *Branchinecta gaini*, al no poseer predadores, ocupan el eslabón más alto de la trama trófica planctónica. La abundancia de estos crustáceos dependerá, pues, de la disponibilidad de alimento y de las características propias de cada lago.

El continente antártico suele subdividirse en dos regiones geográficas de características ambientales muy contrastantes: la Antártida Marítima y la Antártida Continental. La primera comprende principalmente la península Antártica y las islas antárticas y subantárticas, y la segunda el resto del continente.

Los lagos de la zona marítima se hallan más expuestos a la visita de animales marinos (aves y mamífe-


PABLO ALMADA

1. El copépodo Boeckella poppei *domina en un gran número de lagos antárticos y se alimenta de algas planctónicas, algas adheridas a rocas, rotíferos, ciliados e inclusive de sus propias larvas nauplii.*



CRISTINA MARINONE

2. Los copépodos, al igual que muchos otros organismos acuáticos, poseen pigmentos carotenoideos de color rojizo, lo que permite poder observarlos a simple vista a pesar de su pequeño tamaño. Estos pigmentos actúan como fotoprotectores ante el efecto nocivo de la elevada radiación ultravioleta que se regis tra en la Antártida

CRISTINA MARINONE



3. Colonias macroscópicas de Phylodina gregaria. *Este rotífero bentónico de color naranja forma colonias en el lecho de algunos cuerpos de agua eutróficos. Se alimenta principalmente de los pequeños organismos planctónicos que se hallan suspendidos en la columna de agua*

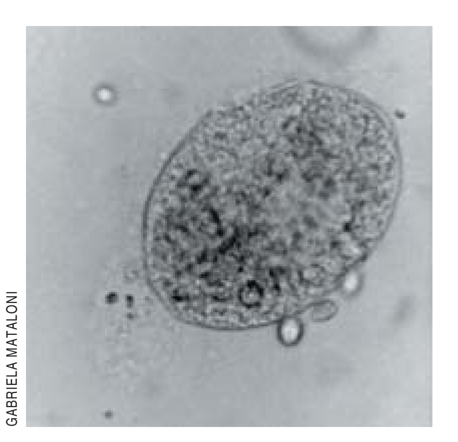
ros), que se acercan a la costa durante el período estival para reproducirse; reciben, pues, el aporte de nutrientes (fosfatos y amonio) proveniente de estos animales, lo que genera un proceso de eutrofización natural. Este proceso genera una mayor diversidad de ambientes con distinto grado de trofismo, vinculado a su cercanía a las zonas de influencia de la fauna; permite, además, una mayor diversidad biológica, ya que la composición del plancton cambia de acuerdo con la carga de nutrientes que posee cada cuerpo de agua. Tenemos un ejemplo de ello en la dominancia de *Chlamydomonas* en el nanofitoplancton de los lagos más eutróficos; y, en la predominancia de crisofitas, como las *Ochromonas*, por lo que concierne a la misma fracción planctónica de los lagos oligotróficos.

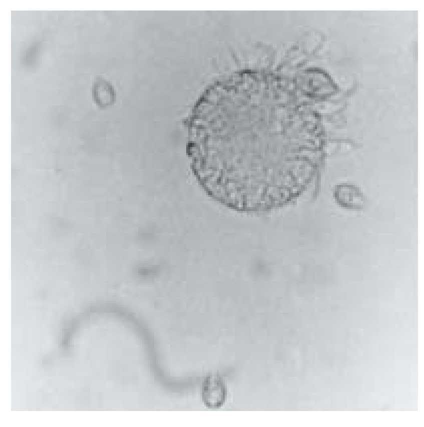
Por otro lado, las diferencias entre los lagos antárticos oligotróficos y eutróficos resultan evidentes a simple vista. Los primeros se caracterizan por sus aguas transparentes y sus fondos se encuentran cubiertos por densos tapetes de algas epilíticas, mientras que los segundos presentan aguas más turbias y la comunidad productora más importante es el fitoplancton.

El estudio de los procesos ecológicos que se dan en estos lagos no sólo reviste interés científico, sino que además tiene su aplicación concreta en la determinación de la calidad del agua para uso humano, ya que muchas de las bases antárticas utilizan para abastecerse el agua proveniente de lagos.

FERNANDO UNREIN
Instituto de Ciencias del Mar,
Barcelona

GABRIELA MATALONI





4. Ciliados fagocitando Chlamydomonas, *algas verdes flageladas muy comunes en los lagos antárticos*

Robledales de España y Portugal

Evolución histórica

Del estudio de las relaciones entre las variantes filogenéticas de las poblaciones y su distribución geográfica se ocupa la filogeografía intraespecífica. Nos enseña ésta que los factores demográficos e históricos ejercen una influencia determinante en la distribución de los linajes.

Entre los hechos históricos de mayor repercusión en la estructura de la vegetación europea actual figuran los episodios cíclicos de retroceso y avance ocurridos a raíz de los cambios climáticos del Cuaternario (dinámica glacial-interglacial). En los períodos más fríos, la vegetación se refugió en ambientes favorables de las tres penínsulas mediterráneas (Balcánica, Ibérica e Itálica), recolonizando cada vez el continente, tras la retirada del frente polar.

El último período glacial (115.000-15.000 años antes del presente) eliminó por completo los bosques templados del centro y norte de Europa. Por ello, la estructura de la vegetación en estas zonas del continente se ha atribuido a la colonización posglacial. Sin embargo, los bosques naturales de las áreas de refugio probablemente conservan, en su estructura genética, huellas de acontecimientos anteriores a la última glaciación.

En los robles, el ADN de cloroplastos (ADNcp) presenta algunas características que convierten a esta molécula en un marcador genético óptimo para estudiar la filogeografía del grupo. En virtud de la herencia exclusivamente uniparental, que con-

fiere un modo de evolución clonal, se pueden rastrear las relaciones de parentesco entre haplotipos; mientras que en virtud de su transmisión materna, que limita el flujo genético, puede abordarse el análisis de las rutas de dispersión.

En el marco de un proyecto de investigación europeo, nuestro grupo de Vitoria ha analizado el ADNcp de 193 poblaciones de seis especies arbóreas (*Quercus canariensis*, *Q. humilis*, *Q. faginea*, *Q. petraea*, *Q. pyrenaica* y *Q. robur*) y una especie arbustiva (*Q. lusitanica*) de los robles de hoja caduca de la península Ibérica. De acuerdo con los resultados, se distinguen 15 haplotipos cuya distribución geográfica se muestra en la figura 2, junto con las relaciones filogenéticas entre los mismos.

Los cuatro linajes maternos en los que se agrupan los 15 haplotipos evidencian una estructura geográfica distintiva. Los linajes A y C ocupan la mayor parte de las regiones catalana y oscense; el linaje B se extiende por la Iberia atlántica; y el linaje D lo hace por la España mediterránea. Esta coincidencia con regiones biogeográficas ampliamente reconocidas respalda la subdivisión histórica de los diferentes linajes.

La manifiesta estructura geográfica de los dos linajes ibéricos (B y D) refleja dos orígenes diferentes, que se remontan a épocas anteriores a la última glaciación. Además, sugiere que durante la última glaciación en la Península coexistieron, al menos, dos zonas de refugio perfectamente delimitadas: en el área mediterránea se conservaron los haplotipos del linaje D; mientras que en la vertiente atlántica hubieron de hacerlo los del linaje B.

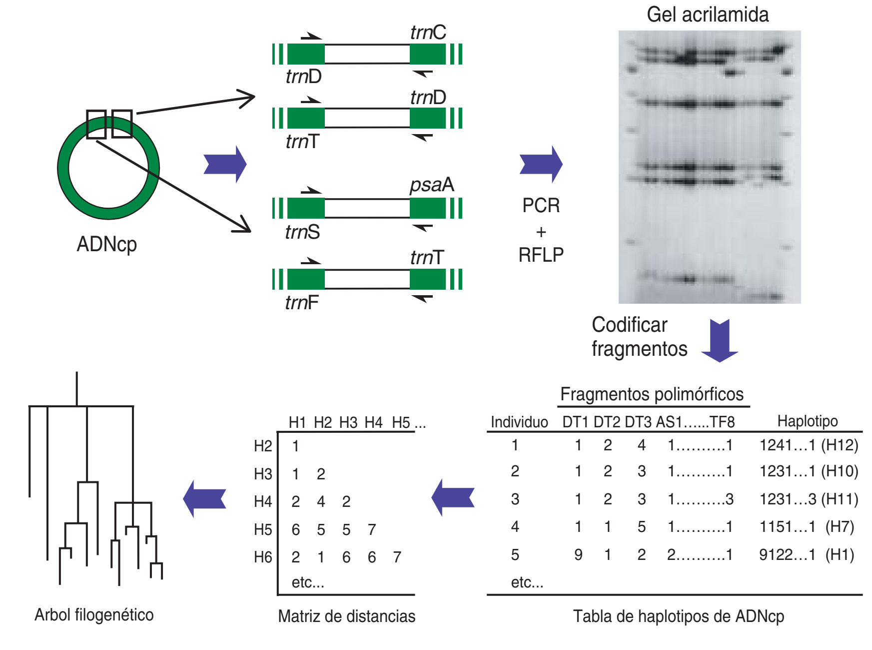
No advertimos una relación clara entre especies y haplotipos, ya que cuando las especies se encuentran en simpatría, o medran en la misma región biogeográfica, comparten el mismo tipo de ADNcp. Sin embargo, es posible que ciertas asociaciones originales entre haplotipos y especies hayan resultado enmascaradas por la expansión del área de distribución de estas últimas. Así, el linaje D se encuentra fundamentalmente en *Q. faginea*; mientras que la gran mayoría de poblaciones de *Q. pyrenaica* muestran haplotipos correspondientes al linaje B.

Con independencia del grado de relación entre estas asociaciones y los procesos de especiación, la hibridación interespecífica y la introgresión (posiblemente unidireccionales debido a razones fenológicas) parecen ser los mecanismos mediante los cuales una especie podría colonizar un área ya ocupada por otra, adquiriendo durante el proceso el haplotipo de esta última.

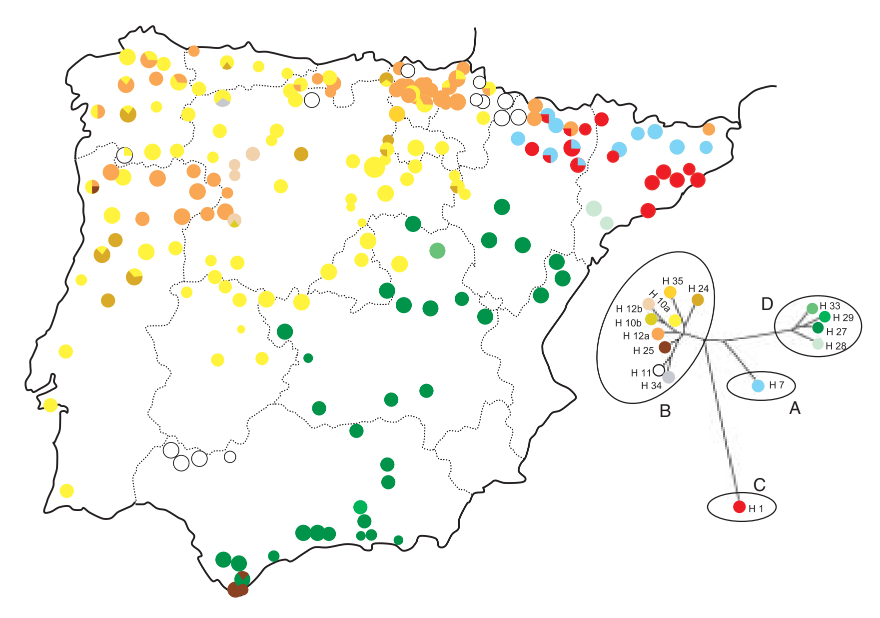
La presencia en la Península de los linajes A y C, procedentes de los Balcanes e Italia, indica que en el pasado hubo una transferencia horizontal de haplotipos en dirección este-oeste. Sin embargo, no existe un consenso para la fecha de esta comunicación entre refugios, ya que mientras algunos autores proponen que esta comunicación tuvo lugar durante el Tardiglacial, nuestra hipótesis preferida es que dicha transferencia tuvo lugar con anterioridad. Si durante el último período glacial los refugios quedaron restringidos por debajo del paralelo 40, la colonización de Cataluña por robles procedentes del este tuvo que producirse durante el Tardiglacial. Sin embargo, cuestionan esta afirmación la persistencia de flora terciaria en enclaves de la cornisa Cantábrica y Cataluña, las elevadas concentraciones de polen de *Quercus* en lugares del norte de España al comienzo del Tardiglacial, o la presencia de polen de *Fagus* en el piso colino del norte peninsular desde el Preboreal.

Los datos aportados por la distribución de haplotipos de ADNcp en los robles de hoja caduca apoyan las tesis mantenidas por palinólogos españoles, en contra del modelo latitudinal estricto preconizado desde el norte de Europa. De acuerdo con el modelo "español", las fluctuaciones altitudinales de la vegetación tuvieron gran importancia en las zonas del sur de Europa, permitiendo la existencia de múltiples enclaves refugio para los distintos tipos de bosques.

En primer lugar, resulta muy difícil explicar la ausencia de 10 de



1. Análisis de los polimorfismos presentes en 4 fragmentos del ADNcp de los robles. Se utilizaron cebadores de PCR complementarios a secuencias conservadas de los genes de ARN de transferencia, para amplificar las regiones no codificantes intermedias. Tras la digestión de los productos de PCR con las enzimas de restricción adecuadas y la electroforesis en geles de acrilamida no desnaturalizante, los haplotipos se definieron a partir de los fragmentos polimórficos. El número de fragmentos diferentes entre haplotipos se utilizó para obtener una matriz de distancias a partir de la cual se construyó el árbol filogenético



2. Relaciones filogenéticas (linajes maternos) y distribución geográfica de los 15 haplotipos de ADNcp detectados en los robles de la península Ibérica. La comparación con los resultados obtenidos en el resto de Europa (datos no mostrados) indica que los linajes B y D se originaron en la península Ibérica; mientras que los linajes A y C proceden de las otras penínsulas mediterráneas. El tamaño de los círculos en el mapa indica el número de individuos cuyo haplotipo fue identificado (entre 2 y 8); mientras que los círculos con sectores indican poblaciones que mostraron más de un haplotipo

los 15 haplotipos (67 %) por debajo del paralelo 40, y su presencia en el norte peninsular, si suponemos que los refugios quedaron restringidos al extremo sur de España. En efecto, los modelos teóricos de recolonización posglacial suponen una pérdida de haplotipos conforme se avanza hacia latitudes más septentrionales, tal y como de hecho se observa para los robles en Europa central y septentrional.

En segundo lugar, la disyunción geográfica mostrada por el haplotipo 11 sugiere que los robles portadores de este haplotipo se refugiarían en el sur y en el norte peninsular. Asimismo, la ausencia en el sur de otros haplotipos relativamente abundantes (haplotipos 12 y 24) apunta hacia la existencia de refugios por encima del paralelo 40, donde tales haplotipos sobrevivieron.

Por último, la presencia de ciertos haplotipos poco comunes en lugares con orografía destacada y microclimas especiales (v.g., los haplotipos 10b y 12b en los Arribes del Duero, el haplotipo 28 en las montañas del sur de Cataluña, el haplotipo 34 en los cañones del Alto Tajo, o el haplotipo 35 en los cañones del Ebro, cercanos al límite entre Alava y Burgos) sugiere una gran importancia de dichos lugares para el refugio de la vegetación. La dificultad para la colonización altitudinal en aquellos cañones y gargantas explicaría que tales haplotipos hayan quedado restringidos a zonas muy específicas, debido al retraso en alcanzar las rutas favorables de recolonización antes de que lo hicieran otros haplotipos procedentes de latitudes más meridionales.

PABLO G. GOICOECHEA
y SANTIAGO ESPINEL
Dpto. de Producción
y Protección Vegetal, Neiker,
Vitoria

Anomalía de Pelger-Huët

El receptor de la lámina B

La anomalía de Pelger-Huët (P-H) es una alteración autosómica dominante de los leucocitos, benigna, que se caracteriza por defectos en la forma y organización estructural del núcleo de los granulocitos.

Los portadores heterocigotos de esta anomalía presentan un núcleo escasamente lobulado y con cromatina tosca, que no alcanza la fase final de su diferenciación, lo que le confiere un aspecto de leucocito inmaduro. Los escasos portadores homocigotos conocidos presentan granulocitos con un núcleo oval. Se han descrito alteraciones en su desarrollo, epilepsia y anomalías esqueléticas.

En la anomalía leucocitaria de P-H, el aspecto morfológico de los leucocitos puede atribuirse equivocadamente a una desviación a la izquierda propia de los procesos infecciosos o inflamatorios. Para evitar el error debe establecerse el diagnóstico diferencial. Leucocitos similares a los que caracterizan a la anomalía de P-H se observan también en ciertos tipos de leucemia, reacciones a drogas tóxicas y otros. Hasta el momento, no se conocían las bases genéticas de esta anomalía.

Para identificar la causa genética de la anomalía de P-H se han estudiado 20 familias portadoras de la misma procedentes de Alemania, Estados Unidos, México y España. Mediante un estudio de ligamiento de amplio espectro en todo el genoma, se ha demostrado que dicha anomalía está ligada al cromosoma 1q41-43. En esta región del cromosoma 1 se aloja el gen que codifica el receptor de la lámina B (RLB). El receptor RLB es miembro de una familia de esterol-reductasas. Se trata de una proteína que ha persistido en el curso de la evolución; se integra en la membrana interna del núcleo y une heterocromatina y lámina B a la membrana nuclear.

Para detectar alteraciones en el gen *RLB* se ha iterado (amplificado) toda la secuencia codificante, así como las zonas intrónicas flanqueantes mediante cebadores específicos, seguido de su secuenciación. Con este método se han identificado ocho mutaciones en el gen *RLB*; cuatro de ellas afectan a los sitios de unión exón-intrón (“splice acceptor/donor”), otras dos son mutaciones de la pauta de lectura (“frameshift”) y las dos restantes, mutaciones sin sentido (“nonsense”) (*véase la tabla*).

PAIS	ID FAMILIA	ID PERSONA	CAMBIO EN EL NUCLEOTIDO	LUGAR	SUSTITUCION AMINOACIDO	CLASE DE MUTACION
Alemania	F10	8238	IVS2-2A → G	Intrón 2	–	Splice acceptor
Alemania	B56	6317	IVS12-5–10del	Intrón 12	–	Splice acceptor
Alemania	S1	6320	IVS12-5–10del	Intrón 12	–	Splice acceptor
Alemania	C58	6343	IVS12-5–10del	Intrón 12	–	Splice acceptor
Alemania	PO2	8197	IVS12-5–10del	Intrón 12	–	Splice acceptor
Alemania	C16	6318	IVS12-5–10del	Intrón 12	–	Splice acceptor
Alemania	C55	8111	IVS12-5–10del	Intrón 12	–	Splice acceptor
Alemania	AO2	8138	IVS12-5–10del	Intrón 12	–	Splice acceptor
Alemania	FO1	6314	IVS12-5–10del	Intrón 12	–	Splice acceptor
Alemania	FO8	6349	IVS12-5–10del	Intrón 12	–	Splice acceptor
Alemania	S2	6321	IVS12-5–10del	Intrón 12	–	Splice acceptor
EE.UU.	USA1	10.824	1308G → A	Exón 10	Trp436X	Nonsense
México	México1	10.760	IVS11-IG → A	Intrón 11	–	Splice donor
España	España1	10.775	1173delC	Exón 9	Gly392fsX393 (Gly392Asp, Leu393X)	Frameshift
España	España2	10.777	1129C → T	Exón 9	Arg377X	Nonsense
España	España5	10.780	1129C → T	Exón 9	Arg377X	Nonsense
España	España6	10.782	1129C → T	Exón 9	Arg377X	Nonsense
España	España3	10.778	IVS13-2A → G	Intrón 2	–	Splice acceptor
España	España7	10.783	IVS13-2A → G	Intrón 2	–	Splice acceptor
España	España4	10.779	(500G→501-504del CTT)	Intrón 2	Ser167tsX176(Ser167Thr, Lys176X)	Frameshift

Los estudios de inmunofluorescencia han mostrado que el receptor de la lámina B está correctamente unido a la membrana nuclear, lo mismo en los linfoblastos normales que en los mutados. Sin embargo, la expresión de RLB es intensa en los sujetos normales, se reduce en los heterocigotos y se torna prácticamente nula en los homocigotos.

Esta variación en la expresión de RLB determina cambios en la lobulación de los neutrófilos y la distribución de la heterocromatina. Así, la hiposegmentación del núcleo de los neutrófilos en los portadores heterocigotos se asocia con la mitad de la cantidad normal del RLB, a la vez que los portadores homocigotos expresan sólo trazas de RLB y no muestran lobulación nuclear. En ambos se halla alterada la estructura de la heterocromatina.

Nuestros hallazgos aportan luz a la comprensión de las interacciones entre la heterocromatina y la membrana nuclear, ayudan a entender la patogenia de las células de tipo Pelger, como las que caracterizan a ciertas formas de leucemia, infecciones o reacciones a drogas tóxicas, y permiten conocer mejor la evolución de la forma del núcleo de los neutrófilos.

En el futuro habrá que investigar si la naturaleza multifuncional del receptor de la lámina B se refleja en la diversidad fenotípica de la anomalía de P-H.

KATRIN HOFFMANN,
BARBARA LUCKE y ANDRÉ REIS,
Centro de Cartografía Génica,
Berlín
CHRISTINE K. DREGER
y HARALD HERRMANN,
Centro de Investigaciones
Oncológicas,
Heidelberg
ADA L. OLINS
y DONALD E. OLINS
Fundación para la Investigación
de la Sangre, Scarborough
LEONARD D. SHULTZ,
Laboratorio Hackson, Bar Harbor,
EE.UU.
HARTMUT KARL, Gelenau
REINHARD KAPS,
Instituto de Medicina
de la Transfusión, Chemnitz
DIETMAR MÜLLER,
Instituto de Genética Médica del
Hospital Clínico de Chemnitz
AMPARO VAYÁ y JUSTO AZNAR,
Dpto. de Biopatología Clínica,
Hospital Universitario La Fe,
Valencia
RUSSELL E. WARE,
Dpto. de Pediatría del Hospital
Clínico de Duke
NORBERTO SOTELO CRUZ,
Hospital Infantil del Estado de
Sonora, Hermosillo
TOM H. LINDNER,
Dpto. de Nefrología del Hospital
Clínico de Würzburg
KARL SPERLING,
Instituto de Genética Humana de
la Universidad Humboldt,
Berlín

Texto y fotos: Josep-Maria Gili, Sergi Rossi,
Nuria Teixidó y Julian Gutt

Así estamos dejando los fondos marinos



1. Fondos marinos de la costa nororiental española a unos 150 m de profundidad. Se aprecian los efectos de las redes de arrastre: esto es lo que queda de lo que eran antes ricas praderas de corales y esponjas, que servían de refugio y daban alimento a especies de peces y otros organismos

Desde hace más de un siglo, el hombre no ha dejado de extraer del mar todo tipo de recursos naturales. En su principal actividad, la pesca, ha utilizado y desarrollado una amplia gama de artes y sistemas que le han permitido extraer del mar mucho más de lo que necesitaba. Durante muchos años, su ambición ha contrastado con la capacidad de recuperación de los océanos ante tal expolio. Por ello han quedado al borde de la extinción numerosas especies, tiempo atrás esenciales para su alimentación.

Si bien se ha intentado regular la extracción desmesurada, las medidas no han bastado para conjurar el peligro de pérdida de las pesquerías en muchas zonas de la Tierra. Ante la falta de recursos, el hombre no ha optado por la vía encomiable de la racionalización de la explotación, sino por el desarrollo de técnicas de extracción cada vez más agresivas y refinadas para llegar a todos los rincones. No sólo han decaído los bancos de pesca tradicionales. Se han esquilmado los propios fondos marinos. Mediante redes de arrastre de grandes dimensiones, cables y otros aparejos, a bordo de barcos de potencia creciente, apenas si se ha dejado plataforma por labrar. Un daño cuya magnitud exacta se desconocía. Merced al progreso en nuevas técnicas y el empleo de vehículos submarinos especiales podemos ahora filmar los fondos y analizar las imágenes del desastre producido.

2. Fotografía de unas pocas colonias de corales blancos (Madrepora oculata) *remanentes en la base de las paredes de un cañón submarino (150 m). Los cables se abandonan una vez las redes quedan atrapadas en los salientes rocosos del cañón*



3. Fondos de la plataforma continental a 80 m de profundidad. Tras continuas pasadas de las redes de arrastre, sólo persisten en el lecho marino las marcas de las puertas con las que están equipadas las redes

4. Restos de redes de pesca abandonadas sobre la pared de un cañón submarino a unos 130 m de profundidad



5. Restos de la actividad humana sobre el fondo marino. A estas imágenes estábamos más acostumbrados, pues nos hemos habituado a considerar el mar un inmenso basurero

El más antiguo de los homínidos

La aparición de nuevos fósiles nos acerca hasta el umbral del origen del linaje humano

Kate Wong

En su despacho de la Universidad de Poitiers, Michel Brunet extrae un fósil fragmentado, de color marrón, de la maleta de seguridad forrada de espuma y, cuidadosamente, lo coloca en la mesa frente a mí. Tiene aproximadamente el tamaño de un coco, con el morro pequeño y unos gruesos rebordes óseos por encima de las cuencas de los ojos. Ante una mirada inexperta la cara parecería a la vez extraña y de una familiaridad indescriptible. Para Brunet, es el semblante del antepasado que lleva buscando desde hace 26 años; se trata, propone, del homínido más antiguo.

Cuando en julio anunciaron su hallazgo Brunet y su equipo causaron un enorme revuelo en el campo de la paleoantropología. Descubierto en los depósitos erosionados por tormentas de arena, en el desierto de Djurab al norte de Chad, este cráneo extraordinario y bastante completo ha recibido el nombre técnico de *Sahelanthropus tchadensis* (y apodado Toumaï, que significa "esperanza de vida" en goran, la lengua local). Con sus cerca de siete millones de años, puede representar el antepasado humano más antiguo del registro fósil, "tocar con su dedo" el punto evolutivo en el que se separaron nuestra línea evolutiva y la del chimpancé.

Hace menos de un siglo, los antepasados humanos africanos y similares a los simios sólo existían en las mentes de algunos científicos perspicaces. Charles Darwin predijo en 1871 que los antepasados originarios del hombre se encontrarían en Africa, donde viven todavía hoy nuestros parientes el chimpancé y el gorila. Pero las pruebas que respaldarían esta hipótesis tardarían más de cincuenta años en llegar, cuando Raymond Dart, anatomista de la Universidad de Witwatersrand, describió un cráneo fósil procedente de Taung (Sudáfrica) y lo atribuyó a una especie humana extinguida, *Australopithecus africanus*, literal-

1. ¿SIMIO O ANTEPASADO NUESTRO? *Sahelanthropus tchadensis*, el presumible homínido más antiguo del registro fósil, se alimentaba de frutos recolectados en un bosque junto al lago Chad, hace unos siete millones de años. De esta especie sólo se han hallado el cráneo y restos dentarios; el cuerpo que el artista ha recreado pertenece al terreno de la especulación.

KAZUHIKO SANO



mente "el simio austral de Africa". Su afirmación fue recibida por algunos con frío escepticismo y por otros con rechazo absoluto (según las críticas los restos pertenecían a un gorila juvenil). El descubrimiento de otra especie sudafricana, denominada *Australopithecus robustus*, devolvió en parte el honor a Dart. Pero, hasta el decenio de 1950, la idea de un antepasado humano similar al simio procedente de Africa no mereció una aceptación mayoritaria.

En los decenios siguientes el esfuerzo de buscadores pioneros en Africa oriental, acometido, entre otros, por la familia Leakey, se recompensó con el hallazgo de nuevos fósiles. A finales de los años setenta, el número de representantes de los australopitecinos había crecido e incluía a *A. boisei*, *A. aethiopicus* y *A. afarensis* (Lucy y su especie, que vivieron entre hace 2,9 y 3,6 millones de años, durante el Plioceno y dio origen a nuestro género *Homo*). Cada una de ellas estaba adaptada a su propio nicho ecológico, pero todas eran bípedas con poderosas mandíbulas, molares grandes y pequeños caninos; diferían, y mucho, de los simios cuadrúpedos, de dieta generalista, del Mioceno, cuya ubicación en el árbol evolutivo les cae muy lejos. Ahora bien, el sondear orígenes humanos anteriores a *A. afarensis* era vérselas con un vacío en el registro fósil que abarcaba entre los 3,6 y los 12 millones de años de antigüedad.

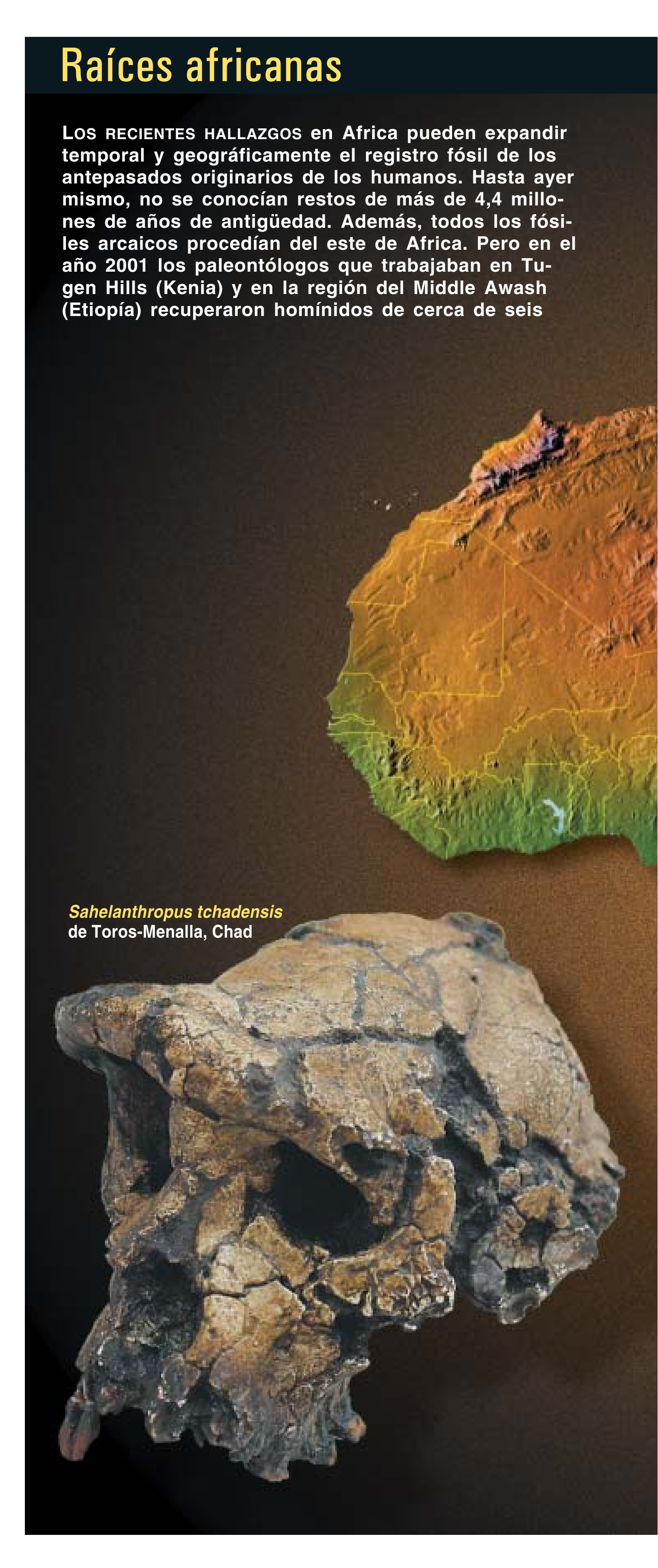
Pese al intenso rastreo, pasaron casi dos decenios sin hallar fósiles diagnósticos, de edad adecuada, para empezar a sospechar quiénes pudieron ser los antepasados de Lucy. La suerte cambió de signo hacia mediados de los años noventa, cuando un equipo dirigido por Meave Leakey, del Museo Nacional de Kenia, anunció el descubrimiento de *A. anamesis*, una especie de cuatro millones de años de antigüedad que tenía características ligeramente más primitivas que Lucy y, por lo tanto, constituía un precursor suyo razonable [*véase* "Antiguos fósiles de homínidos en Africa", por Meave Leakey y Alan Walter; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 1997]. Por esas mismas fechas, Tim D. White, de la Universidad de Califor-

Resumen/*Los homínidos más antiguos*

- En los manuales de evolución humana se lee que los homínidos proceden de un antepasado, similar al chimpancé, que vivió hace entre seis y cinco millones de años en Africa oriental y adquirió la locomoción bípeda en un entorno de sabana. Pero hasta hace muy poco se desconocían fósiles de homínidos de más de 4,4 millones de años de antigüedad.
- Los hallazgos recientes procedentes de Chad, Kenia y Etiopía, que amplían el registro fósil hasta los siete millones de años de antigüedad, podrían corresponder a los homínidos más antiguos.
- Estos especímenes cuestionan ideas arraigadas en paleoantropología. No existe acuerdo, sin embargo, sobre el parentesco entre tales fósiles y el linaje humano, en la hipótesis de que hubiera alguno.

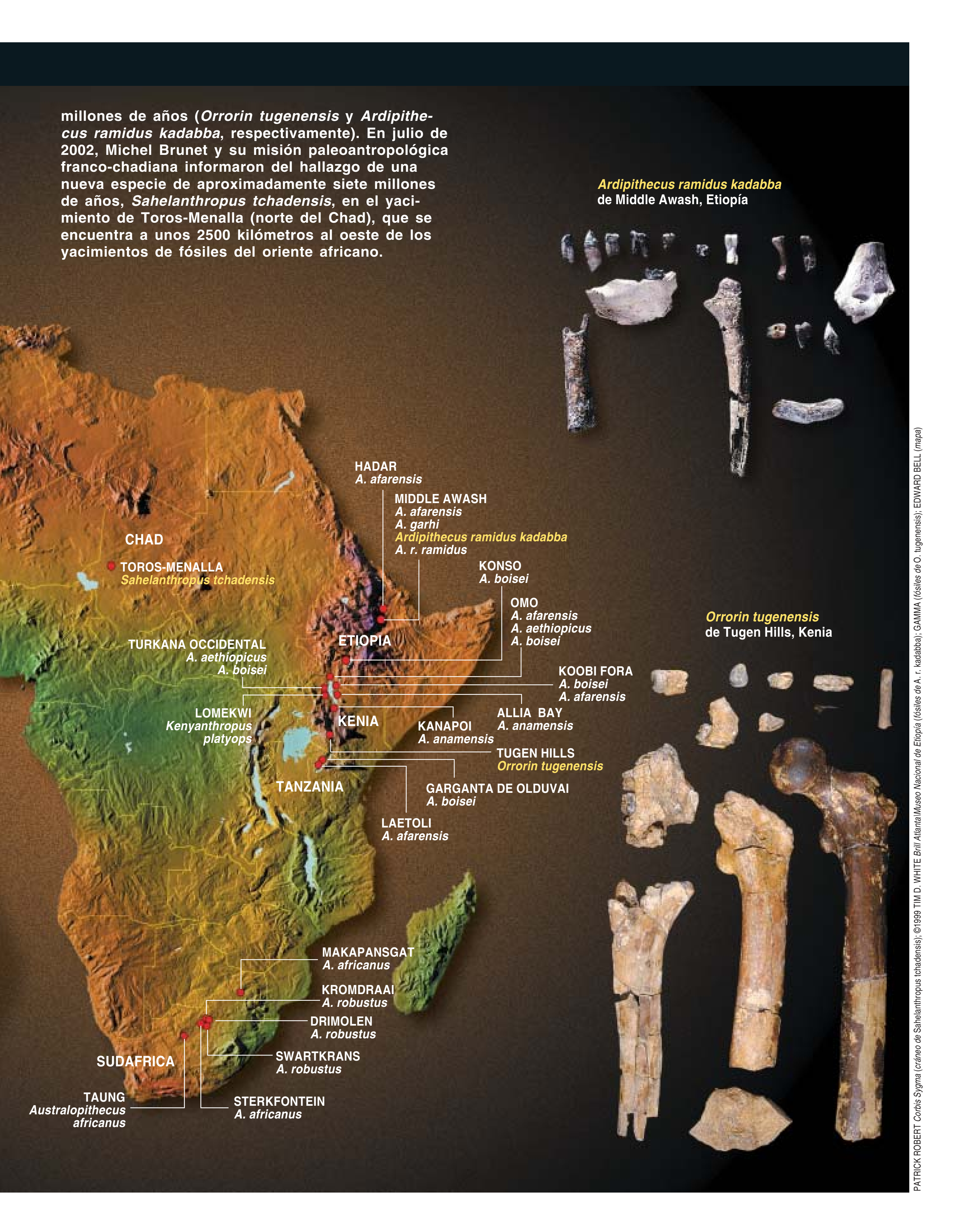
Raíces africanas

LOS RECIENTES HALLAZGOS en Africa pueden expandir temporal y geográficamente el registro fósil de los antepasados originarios de los humanos. Hasta ayer mismo, no se conocían restos de más de 4,4 millones de años de antigüedad. Además, todos los fósiles arcaicos procedían del este de Africa. Pero en el año 2001 los paleontólogos que trabajaban en Tugen Hills (Kenia) y en la región del Middle Awash (Etiopía) recuperaron homínidos de cerca de seis



Sahelanthropus tchadensis **de Toros-Menalla, Chad**

millones de años (*Orrorin tugenensis* y *Ardipithecus ramidus kadabba*, respectivamente). En julio de 2002, Michel Brunet y su misión paleoantropológica franco-chadiana informaron del hallazgo de una nueva especie de aproximadamente siete millones de años, *Sahelanthropus tchadensis*, en el yacimiento de Toros-Menalla (norte del Chad), que se encuentra a unos 2500 kilómetros al oeste de los yacimientos de fósiles del oriente africano.



PATRICK ROBERT *Corbis Sygma* (*cráneo de* Sahelanthropus tchadensis); ©1999 TIM D. WHITE *Brill Atlanta/Museo Nacional de Etiopía* (*fósiles de* A. r. kadabba); GAMMA (*fósiles de* O. tugenensis); EDWARD BELL (*mapa*)

nia en Berkeley, y su equipo describieron un conjunto de fósiles de 4,4 millones de años de antigüedad hallados en Etiopía. Correspondían a un homínido aún más primitivo, ahora denominado *Ardipithecus ramidus ramidus*.

Estos hallazgos proporcionaron un atrayente acercamiento a momentos evolutivos anteriores a Lucy. Pero la estimación de algunos biólogos moleculares a propósito del momento en que se separaron las líneas evolutivas de chimpancés y humanos sugería que aún existían homínidos más antiguos esperando que alguien los desenterrase.

Estas predicciones se han confirmado. En los últimos años, se han cosechado una serie de descubrimientos sensacionales (entre los que se encuentra el hallazgo de Brunet) que han contribuido a rellenar el hueco que existía entre los humanos y sus antepasados antropomorfos africanos. Estos fósiles, que tienen de cinco a siete millones de años de antigüedad, cuestionan ideas admitidas desde hace mucho tiempo acerca de cuándo y dónde surgió nuestro linaje y sobre cómo era el antepasado común de humanos y chimpancés. No ha de sorprender que en torno a ello se desencadenara un vivo debate. Las posiciones se han dividido en torno al lugar evolutivo que deben ocupar las nuevas especies y, principalmente, en torno a los rasgos que caracterizan a un homínido.

Erguidos

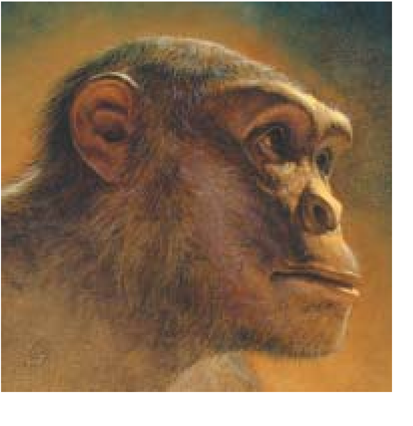
La primera prueba de homínidos que traspasaban el límite de los 4,4 millones de años se dio a conocer en la primavera de 2001. Martin Pickford y Brigitte Senut, del Museo de Historia Natural de París, habían encontrado en Tugen Hills (Kenia) restos de un espécimen de seis millones de años; lo adscribieron a una nueva especie, *Orrorin tugenensis*. Hasta la fecha se han reunido diecinueve fósiles, que incluyen pequeños fragmentos de mandíbula, dientes sueltos, falanges de la mano y huesos del brazo, con fragmentos de fémur. Según Pickford y Senut, *Orrorin* muestra algunas características que lo relacionan con la familia de los homínidos, en particular, las que sugieren que tenían un modo de locomoción bípeda. En palabras de Pick-



Anatomía de nuestro antepasado

ALGUNOS RASGOS resultan decisivos para relacionar *Ardipithecus ramidus kadabba*, *Orrorin* y *Sahelanthropus* con el linaje humano y distinguirlos de chimpancés y otros antropomorfos. Los fósiles exhiben ciertas características primitivas similares a las de los simios, como podría esperarse de seres tan antiguos. Así, la falange de pie de *A. r. kadabba* tiene orientada la superficie articular proximal hacia arriba, lo mismo que los humanos; pero la falange es larga y la diáfisis está curvada, lo mismo que las de los chimpancés (esto hace poco clara la inclinación de la articulación). De igual forma, *Sahelanthropus* presenta una serie de rasgos similares a los simios (su pequeña capacidad craneal, entre otros), pero se asemeja más a los humanos en la morfología de los caninos y en la proyección de la mandíbula. [La reconstrucción del cráneo de *Sahelanthropus*, que está deformado, permitirá comprender mejor su morfología.] El fémur proximal de *Orrorin* tiene un cuello largo y un surco formado por el músculo obturador externo (rasgos asociados con la locomoción bípeda y, por ende, con los humanos); sin embargo, la distribución del hueso cortical en el cuello del fémur puede parecerse más a la que evidencian los simios cuadrúpedos.

© C. OWEN LOVEJOY*Brill Atlanta* (*falange de pie humano,* A. r. kadabba *y chimpancé*); CHRISTIAN SIDOR *Instituto de Medicina Osteopática de Nueva York* (*cráneo y fémur humano*); MISION PALEOANTROPOLOGICA FRANCO-CHADIENSE (*cráneo de* Sahelanthropus); ©1996 DAVID L. BRILL\DIVISION DE MAMIFEROS, MUSEO NACIONAL DE HISTORIA NATURAL, INSTITUCION SMITHSONIANA (*cráneo de chimpancé*); GAMMA (*fémur de* Orrorin); C. OWEN LOVEJOY *Universidad estatal de Kent* (*fémur de chimpancé*)



ford, "el fémur es sorprendentemente similar al de los humanos". El cuello del fémur es largo, lo que habría dispuesto la diáfisis del fémur en ángulo respecto a la tibia (y de ese modo estabilizaría la pelvis). También presenta un surco en la cara posterior del cuello femoral, donde el músculo obturador externo presiona durante la locomoción bípeda. En otros aspectos, *Orrorin* es una especie primitiva: su diente canino es largo y más apuntado que los caninos humanos, y sus huesos del brazo y de los dedos conservan adaptaciones trepadoras. Pero las características del fémur significan para Pickford y Senut que, en el suelo, *Orrorin* deambulaba erguido.

Afirman, en concreto, que *Orrorin* parece tener una locomoción bípeda más similar a los humanos que la de Lucy, muy posterior cronológicamente. Proponen incluso que *Orrorin* evolucionó hacia *Homo* a través de otro género, *Praeanthropus* (que comprende algunos de los fósiles asignados en la actualidad a *A. afarensis* y *A. anamensis*), y sitúan a Lucy y a su especie en una línea evolutiva distinta. Para ellos, además, *Ardipithecus* constituye un antepasado del chimpancé.

Pero no todos están convencidos de la morfología del fémur. C. Owen Lovejoy, de la Universidad estatal de Kent, responde que las imágenes publicadas, obtenidas por tomografía computarizada, del cuello femoral de *Orrorin* muestran una distribución del hueso cortical similar a la de los chimpancés, un indicador muy importante de las tensiones que se producen en esta parte del fémur durante la locomoción. (Aunque Pickford y Senut afirman que muestran una estructura ósea similar a la humana.) En cambio, Lovejoy defiende que las secciones del cuello femoral de *A. afarensis* son completamente humanas. Según este mismo autor, *Orrorin* frecuentemente, aunque no de forma continua, desarrollaría una locomoción bípeda, si bien pasaría parte importante de su tiempo en los árboles. Esto no lo excluiría de su condición de homínido, porque la auténtica locomoción bípeda no habría aparecido de un solo golpe; *Orrorin* podría no haber adquirido todos los rasgos necesarios para la bipedación cabal. Desde esa perspectiva, *Orrorin* podría seguir perteneciendo a nuestra línea evolutiva, aunque algo más alejado de *Homo* de lo que opinan Pickford y Senut.

Según Lovejoy, una prueba más sólida en pro de una locomoción bípeda habitual sería la aportada, unos meses después del artículo del *Orrorin*, por Yohannes Haile-Selassie. Este alumno de doctorado en Berkeley anunció el hallazgo de unos fósiles ligeramente más recientes procedentes de la región del Middle Awash (Etiopía). Con una antigüedad de entre 5,2 y 5,8 millones de años, se han asignado a una subespecie de *Ardipithecus ramidus*: *A. r. kadabba*. Incluyen una falange de pie completa que tiene un rasgo revelador. Lovejoy explica que la articulación proximal del hueso presenta la orientación que esperaríamos si *A. r. kadabba* caminase igual que los humanos (realizando el impulso final que efectuamos con la punta de los dedos del pie al andar).

A otros paleontólogos no les parece tan singular la morfología de la falange de pie. David Begun, de la Universidad de Toronto, no considera que difiera de la falange de pie de un chimpancé, subrayando que, por lo que se aprecia en las fotografías, resulta más larga, delgada y curva que la falange de un bípedo. Para dirimir la cuestión habrá quizá que esperar a que White y sus colaboradores publiquen el hallazgo del esqueleto parcial, todavía inédito, de *Ardipithecus*.

Pese a las diferentes interpretaciones anatómicas, si *Orrorin* o *Ardipithecus* fueron bípedos el origen de nuestro particular modo de locomoción habría retrocedido 1,5 millones de años en el tiempo. También se rechazaría la idea general sobre las condiciones en que evolucionó nuestra forma de caminar. La opinión mayoritaria establece que nuestros antepasados se convirtieron en seres bípedos en la sabana africana, donde caminar erguidos habría impedido que el sol les abrasara la espalda, les permitió el acceso a recursos alimentarios antes inalcanzables y les proporcionó una mejor visión por encima de la hierba alta. Pero los



análisis paleoecológicos indican que *Orrorin* y *Ardipithecus* vivían en hábitats boscosos, junto a monos y otras especies típicas de floresta. El equipo encabezado por Giday Wolde-Gabriel, del Laboratorio Nacional de Los Alamos, ha analizado la química del suelo y los restos de fauna del yacimiento de *A. r. kadabba* y señalan que, hasta hace unos 4,4 millones de años, los primeros homínidos no se aventurarían lejos de los ambientes húmedos y arbolados.

Si ocurrió así, los cambios climáticos no habrían ejercido la influencia que se les atribuye en instar la sustitución de la locomoción cuadrúpeda por la bípeda. Por su parte, Lovejoy observa que algunas de las hipótesis sobre la adquisición de la postura bípeda que se basaban en los ecosistemas de sabana carecían de fundamento, pues la simple selección a favor de una postura erguida no habría conducido, por sí sola, a la adquisición de la locomoción bípeda. Lovejoy entiende que el surgimiento de la bipedación responde a una doble exigencia: libera las manos y permite a los machos recolectar más alimentos para sus parejas. En este modelo, que desarrolló en los años ochenta, las hembras que eligiesen los machos que les aportasen más alimento podrían dedicar su energía al cuidado de las crías y, por lo tanto, aumentarían el éxito reproductivo de su pareja.

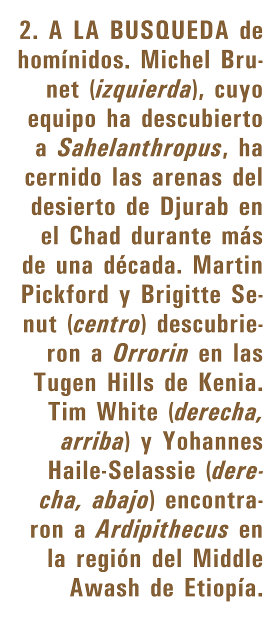
¿El antepasado más antiguo?

Mientras la comunidad de paleoantropólogos debatía las implicaciones de los descubrimientos de *Orrorin* y *A. r. kadabba*, apareció el fósil de Chad aportado por Brunet. Con *Sahelanthropus* han llegado nuevas respuestas; y también nuevas preguntas. A diferencia de lo que aconteció en los casos de *Orrorin* y *A. r. kadabba*, los fósiles de *Sahelanthropus* no incluyen huesos del esqueleto poscraneal; esa ausencia impide aseverar si esta especie fue bípeda, el carácter distintivo empleado en la definición tradicional de homínido. Pero Brunet cree que un conjunto de rasgos dentales y del cráneo (que debido al gran reborde supraorbital opina que perteneció a un macho) permite relacionar claramente a esta especie con los homínidos que vinieron después. En esta valoración reviste particular importancia la morfología de los caninos de *Sahelanthropus*. En todos los simios actuales y fósiles, y presumiblemente en el último antepasado común de chimpancés y humanos, los caninos superiores son grandes y se desgastan por el roce con el primer premolar inferior, produciéndose un borde afilado en la cara posterior de los caninos. Esta morfología se denomina complejo canino-premolar; se manifiesta con nitidez en los machos que se sirven de los caninos para competir entre sí por acceder a las hembras. Los humanos hemos perdido estas armas de lucha, desarrollando caninos pequeños con una morfología similar a la de los incisivos (incisiviforme). Los caninos humanos se desgastan entre sí por sus coronas; con el tiempo, aparece un patrón peculiar de desgaste. Brunet afirma que los caninos de *Sahelanthropus,* por su tamaño, forma y desgaste, han evolucionado en dirección a los humanos.

Pero *Sahelanthropus* muestra también rasgos primitivos, simiescos; por ejemplo, una caja craneana pequeña y órbitas oculares muy separadas. Para Brunet, este mosaico de características primitivas y derivadas sugiere un parentesco estrecho con el último antepasado común. Y propone que *Sahelanthropus* es el miembro más antiguo del linaje humano y el antepasado de todos los homínidos posteriores, *Orrorin* y *Ardipithecus* incluidos. Si Brunet está en lo cierto, la humanidad habría aparecido más de un millón de años antes que lo estimado por diversos estudios moleculares. Y, aún más importante, podría tener su origen en un

WITNESS/GAMMA





2. A LA BUSQUEDA de homínidos. Michel Brunet (*izquierda*), cuyo equipo ha descubierto a *Sahelanthropus*, ha cernido las arenas del desierto de Djurab en el Chad durante más de una década. Martin Pickford y Brigitte Senut (*centro*) descubrieron a *Orrorin* en las Tugen Hills de Kenia. Tim White (*derecha, arriba*) y Yohannes Haile-Selassie (*derecha, abajo*) encontraron a *Ardipithecus* en la región del Middle Awash de Etiopía.

lugar diferente de donde se había propuesto. Yves Coppens, del Colegio de Francia, avanzó en los años ochenta un modelo sobre el origen de los homínidos, en el que situaba la cuna de la humanidad en Africa oriental. Basándose en que los fósiles de homínidos más primitivos proceden de Africa oriental, señaló que el valle del Rift (una falla imponente que recorre Africa de norte a sur) separó a la especie de simio ancestral en dos poblaciones. Una de ellas, la del este, dio origen a los humanos; la del oeste generaría a los simios actuales. Hace tiempo que la paleontología sospechaba que esta aparente separación geográfica podría deberse a un artefacto en la escasez de registro fósil. El hallazgo de un homínido de siete millones de años de antigüedad en el Chad, a más de 2500 kilómetros al oeste del Valle del Rift, vendría a dar el golpe de gracia a esta teoría.

Pero lo más sorprendente de todo es lo que *Sahelanthropus* muestra sobre el último antepasado común de chimpancés y humanos. Los paleoantropólogos se imaginaban dicho antepasado de forma muy similar al chimpancé, con un mentón prominente, dotado de molares con escaso esmalte y caninos poderosos. Pero he aquí que *Sahelanthropus*, por rasgos simiescos, presenta sólo moderado prognatismo, bastante esmalte molar, caninos pequeños y un reborde óseo de las órbitas mayor que el de cualquier antropomorfo actual. Si *Sahelanthropus* nos enseña algo, opina White, es que el último antepasado común no era chimpancé. Pero, ¿cabía acaso esperar otra cosa? Los chimpancés han contado con el mismo tiempo de evolución que los humanos, hasta convertirse en un primate frugívoro muy especializado.

No obstante, la tesis de Brunet, según la cual los fósiles del Chad pertenecerían a un antepasado de los humanos, se ha recibido con reticencia. Para Carol V. Ward, de la Universidad de Missouri, dista de ser palmaria la adscripción homínida de *Sahelanthropus*. Con otros paleontólogos, Ward se muestra escéptico ante la propuesta semejanza entre sus caninos y los humanos. En la misma línea de crítica, Milford H. Wolpoff, de la Universidad de Michigan, y los descubridores de *Orrorin*, Pickford y Senut, publicaron una carta en *Nature* (donde el equipo de Brunet había expuesto sus resultados) en la que defendían que *Sahelanthropus* era un simio, no un homínido. En su opinión, el poderoso reborde supraorbicular, unido a ciertos rasgos de la base de la parte posterior del cráneo de *Sahelanthropus*, evocan la anatomía de un simio cuadrúpedo con una dieta de alimentos duros; a su vez, los caninos pequeños indican que se trataría de una hembra de esa especie y no de un macho de un antepasado de los humanos. Y prosiguen: al carecer de pruebas sobre la locomoción bípeda de *Sahelanthropus,* a Brunet no le quedaría ningún punto de apoyo. (Pickford y Senut llegan incluso a afirmar que se trata de un antepasado de los gorilas.) En una réplica mordaz,







©1998 DAVID L. BRILL *Brill Atlanta (arriba)*; GAMMA *(abajo a la izquierda)*; ©1998 DAVID L. BRILL *Brill Atlanta (abajo a la derecha)*

Serie temporal de los homínidos



EL REGISTRO FÓSIL DE HOMÍNIDOS revela la convivencia de varias especies durante los últimos estadios de la evolución. Sin embargo, sigue siendo objeto de debate entre los paleoantropólogos el que se diera ese fenómeno también durante la primera mitad de la evolución de nuestra familia. Algunos creen que todos los fósiles de entre siete y tres millones de años de antigüedad pueden situarse en la misma línea evolutiva. Otros piensan que estos especímenes no sólo son miembros de diferentes líneas evolutivas, sino que constituyen, además, los representantes de la enorme diversidad de primeros homínidos que todavía no se han descubierto. [Quienes se adhieren a la segunda hipótesis suelen dividir los restos de homínidos en más taxones de los que aparecen aquí.]

Los árboles evolutivos (*a la derecha*) muestran dos hipótesis sobre la vinculación de las especies recientemente descubiertas *Sahelanthropus*, *Orrorin* y *Ardipithecus ramidus kadabba* con los humanos. En el árbol de la izquierda, todos los nuevos hallazgos se encuentran en la línea evolutiva que conduce a los humanos, siendo *Sahelanthropus* el homínido más antiguo conocido. En cambio, en el árbol de la derecha sólo *Orrorin* sería antepasado nuestro. Además, *Ardipithecus* constituiría un antepasado de los chimpancés y *Sahelanthropus* un ancestro de los gorilas.

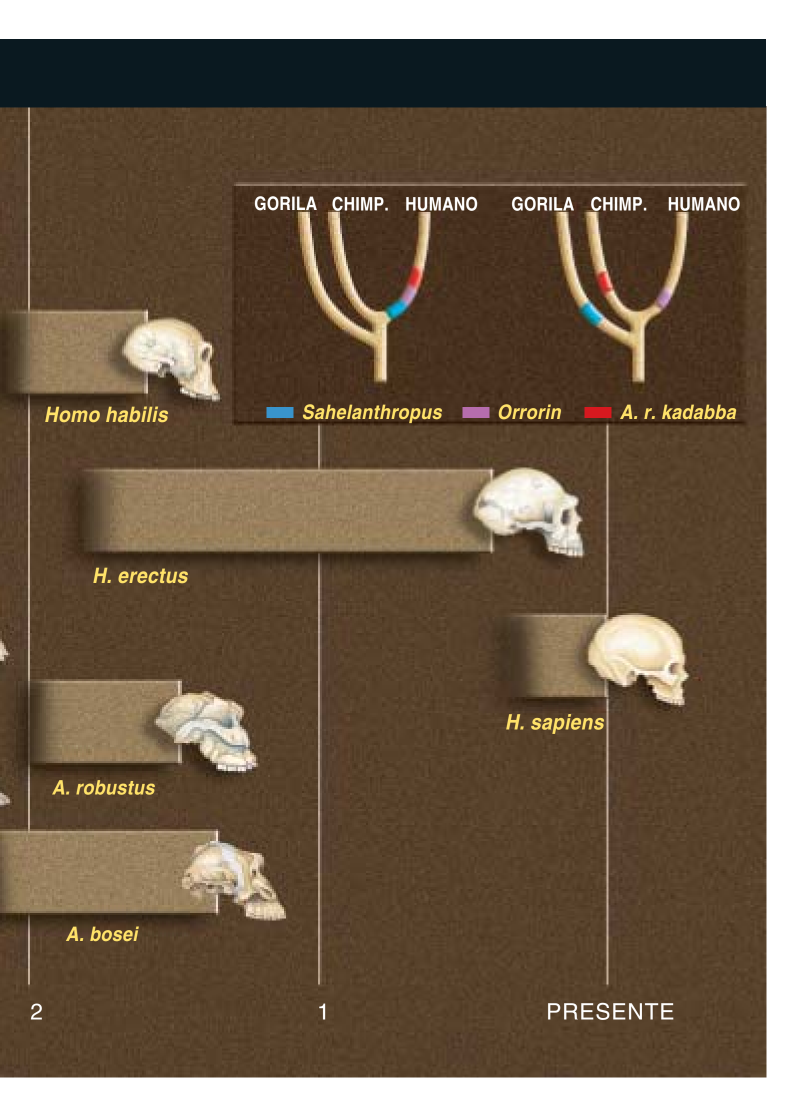
ILUSTRACIONES DE PATRICIA J. WYNNE Y CORNELIA BLIK

Brunet comparó a sus detractores con los que criticaron a Dart en 1925, respondiendo que los rasgos simiescos de *Sahelanthropus* son simplemente vestigios primitivos heredados de su antepasado antropomorfo y, por tanto, sin nada que decir con respecto a su grado de parentesco con los humanos.

Estas opiniones contrapuestas reflejan, en parte, la discrepancia reinante en torno a lo que define la singularidad del linaje humano. Lo reconoce sin ambages Roberto Macchiarelli, de la Universidad de Poitiers. Desde siempre, los paleoantropólogos habían visto en la locomoción bípeda la característica que separó del resto de los antropomorfos a los antepasados de los homínidos. Pero esa disyunción pudo venir precedida por cambios más sutiles, verbigracia, la transformación del canino.

Para explicar el grado de parentesco entre las especies animales la biología evolutiva se sirve del método cladístico. De acuerdo con el mismo, los organismos se agrupan en razón de caracteres derivados compartidos. Expuesto en grandes líneas, las especies que tienen características en común derivadas se consideran más estrechamente emparentadas entre sí que las que sólo muestran rasgos primitivos heredados de un antepasado común más lejano. La presencia en el registro fósil de un rasgo derivado compartido sirve de hito indicador de la división de una especie ancestral en dos especies descendientes (en nuestro caso, para establecer el punto de divergencia de los humanos y de los chimpancés a partir de una especie ancestral); este rasgo se considera la característica que define al grupo.

Así, según la cladística, razona William H. Kimbel, de la Universidad estatal de Arizona, un homínido puede describirse, desde el punto de vista de su morfología esquelética, por las características óseas conservadas que encontramos en las poblaciones que fueron el resultado inmediato del evento genético de separación de humanos y chimpancés. Con un registro fósil tan escaso, los paleontólogos no pueden saber con seguridad cuáles son tales rasgos, pero los dos mejores candidatos para definir a los homínidos son, en opinión de Kimbel, la locomoción bípeda y la transformación del canino. Ahora se trata de reconocer cuáles fueron estos cambios iniciales y cuál de las supuestas especies de homínidos se encuentra en la base del clado de los humanos. Ocurre que *Orrorin*, *A. r. kadabba* y *Sahelanthropus* están representados por diferentes partes óseas, lo que dificulta sobremanera las comparaciones entre ellos.



¿Cuántos homínidos?

El establecimiento de los tres nuevos taxones ha avivado el debate sobre la diversidad de los primeros homínidos. En el intervalo temporal que transcurrió entre hace tres y 1,5 millones, hubo, admiten los paleontólogos, múltiples especies de homínidos, coetáneas algunas. Esta cascada de hallazgos nos muestra que la evolución humana fue un asunto complejo desde sus inicios. Begun, que opina que los simios miocenos, antepasados de los antropomorfos africanos actuales y los humanos, pasaron sus primeras etapas evolutivas en Europa y Asia occidental antes de volver a entrar en Africa, destaca que *Sahelanthropus* tiene exactamente el conjunto de rasgos heterogéneos que podríamos esperar en un animal que formó parte de una expansión adaptativa de los simios a otros ecosistemas. Sugiere la posibilidad de que hubiera de 10 a 15 géneros de animales con un parentesco más estrecho con los humanos que con los chimpancés. Bernard Wood, de la Universidad George Washington, se ha planteado incluso la posibilidad de que *Sahelanthropus* reflejara, por lo que concierne a los antropomorfos africanos, una situación análoga al famoso yacimiento canadiense de Burguess Shale. Este yacimiento ha proporcionado millares de fósiles de invertebrados del período Cámbrico, el momento en que los grupos más importantes de los animales actuales aparecieron de forma repentina. Considerado desde esta óptica, el árbol evolutivo de los humanos se parecería a un arbusto en el que algunos (si no todos) de los nuevos descubrimientos se encontrarían en los ápices terminales de las ramas; una imagen, ésta, más próxima a la verdad que la representación de puntos de una línea sinuosa que desemboca en el hombre.

Otros paleontólogos, basados en las especies descubiertas hasta la fecha, advierten del peligro de inferir la presencia de numerosas coetáneas. White y Brunet apuntan que, en el arco temporal que va de los siete a los cuatro millones de años antes del presente, sólo se conoce una especie de homínido que viviera en cualquier momento. ¿De qué arbusto hablamos, entonces?, pregunta Brunet. Según White, incluso en el momento de máxima diversidad de la humanidad, hace dos millones de años, sólo había tres taxones compartiendo el paisaje. No cabe aludir, pues, a ninguna explosión cámbrica, replica. Más aún, afirma White, las pruebas disponibles sólo avalan que la base del árbol de la familia sea un tronco. Piensa que todos los nuevos hallazgos pueden representar instantáneas de la línea evolutiva de *Ardipithecus* en diferentes momentos. *Sahelanthropus* sería el homínido más antiguo y *Orrorin* y *A. r. kadabba*, descendientes suyos en el mismo linaje. (Según esta interpretación, *Sahelanthropus* y *Orrorin* constituirían especies del género *Ardipithecus*.)

Los investigadores están de acuerdo en que hacen falta más fósiles para esclarecer el grado de parentesco que vincula a *Orrorin*, *A. r. kadabba* y *Sahelanthropus* entre sí y con nosotros. Pero no será fácil obtener una imagen de mayor resolución de los orígenes de la humanidad. A medida que nos acerquemos al antepasado común se irán multiplicando los problemas para diagnosticar los primeros miembros de nuestro clado. Pero importa conocer el punto de arranque. Los nuevos hallazgos podrían encerrar la clave para responder a la cuestión sobre el origen de nuestro linaje.

Bibliografía complementaria

LATE MIOCENE HOMINIDS FROM MIDDLE AWASH, ETHIOPIA. Yohannes Haile-Selassie en *Nature*, vol. 412, páginas 178-181; 12 de julio de 2001.

EXTINC HUMANS. Ian Tattersall y Jeffrey H. Schwartz. Westview Press, 2001.

BIPEDALISM IN *ORRORIN TUGENENSIS* REVEALED BY ITS FEMORA. Martin Pickford, Brigitte Senut, Dominique Gommercy y Jacques Treil en *Comptes Rendus: Palevol*, vol. 1, nº. 1, páginas 1-13; 2002.

A NEW HOMINID FROM THE UPPER MIOCENE OF CHAD, CENTRAL AFRICA. Michel Brunet, Franck Guy, David Pilbeam, Hassane Taisso Mackaye *et al*. en *Nature*, vol. 418, páginas 145-151; 11 de julio de 2002.

THE PRIMATE FOSSIL RECORD. Dirigido por Walter C. Hartwig. Cambridge University Press, 2002.

Nueva pirámide de la alimentación



Frente a la opinión extendida, el consumo de ciertas grasas reporta beneficios para el corazón; en cambio, hay numerosos hidratos de carbono dañinos

Walter C. Willett y Meir J. Stampfer



RICHARD BORGE

En 1992 el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) publicó un documento oficial, conocido por "pirámide de la alimentación", que se proponía como guía alimentaria orientada a mantener un buen estado físico y reducir los riesgos de enfermedades crónicas. Las recomendaciones contenidas en la pirámide pronto alcanzaron gran difusión: el consumo de grasas y aceites tenía que rebajarse al mínimo, pero de seis a 11 veces al día había que tomar alimentos ricos en hidratos de carbono complejos: pan, cereales, arroz, pasta. Asimismo, se recomendaban generosas cantidades de verduras (incluso de patatas, otra abundante fuente de hidratos de carbono), frutas y productos lácteos, y al menos dos ingestiones diarias del grupo formado por carnes rojas y blancas, pescados, huevos, frutos secos y legumbres.

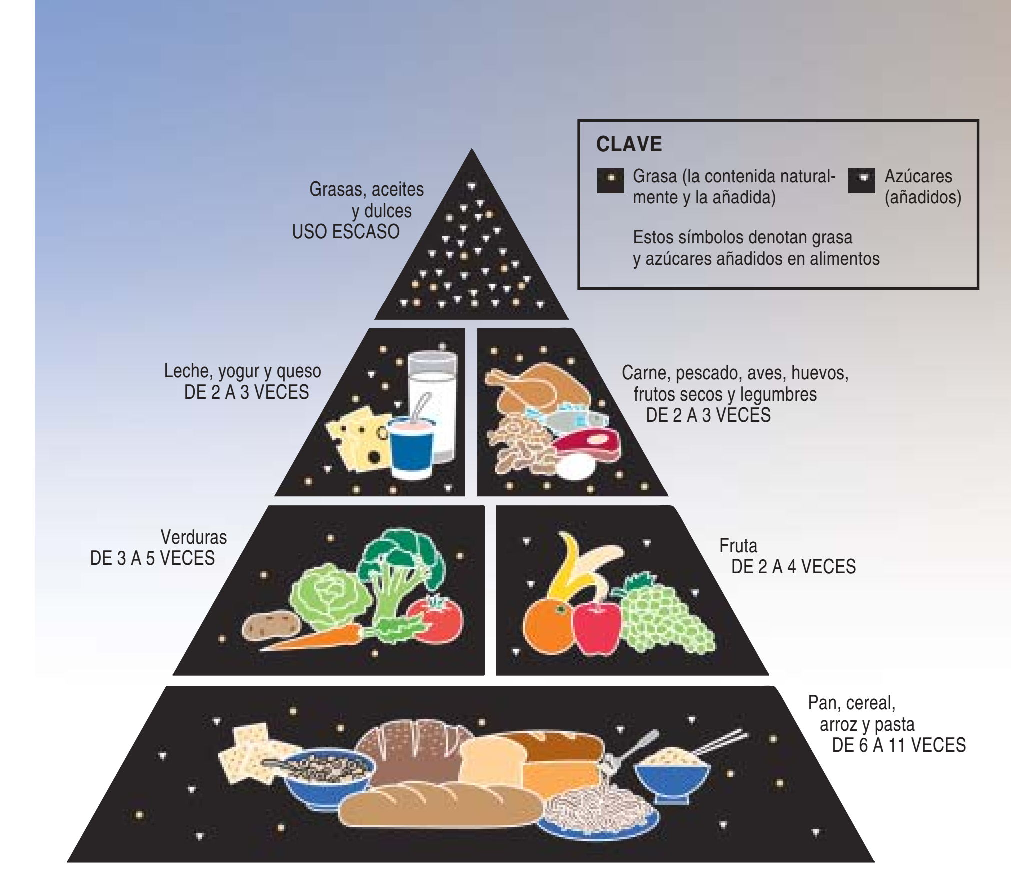
Sin embargo, aun durante el desarrollo de la pirámide, los especialistas en nutrición sabían de sobra que ciertos tipos de grasa son esenciales para la salud y reducen el riesgo de enfermedad cardiovascular. Había, además, pocas pruebas de que una elevada ingesta de hidratos de carbono fuese beneficiosa. Desde 1992 se advierten defectos cada vez más graves en la pirámide de la alimentación. Es un error promover el consumo de todos los hidratos de carbono complejos y prohibir las grasas y aceites en general. Ni todos los lípidos son dañinos, ni todos los hidratos de carbono complejos son buenos para cualquier persona.

El Centro de política y promoción nutricional del USDA vuelve ahora a redefinir la pirámide, pero no se espera dar cima a esta labor antes de 2004. Entre tanto, hemos elaborado una nueva pirámide que refleja mejor la visión actual de las relaciones entre dieta y salud. Los estudios indican que la observancia de las recomendaciones allí señaladas puede limitar los riesgos de afecciones cardiovasculares, lo mismo en varones que en mujeres.

¿Cómo pudo equivocarse tanto la pirámide original? En parte, porque los especialistas sucumbieron al deseo de simplificar sus recomendaciones alimentarias. Desde hace décadas se sabía que las grasas saturadas —abundantes en la carne roja y los productos lácteos— elevan los niveles de colesterol en la sangre, y que a su vez esos altos niveles de colesterol comportan un notable riesgo de enfermedad coronaria (ataques cardíacos y otras dolencias producidas por la obstrucción de las arterias que conducen al corazón). Así lo determinaron los estudios

de nutrición desarrollados en los años sesenta, entre participantes que ingerían a lo largo de varias semanas dietas cuidadosamente preparadas. Pero también se demostró entonces que las grasas poliinsaturadas —que existen en aceites vegetales y en pescados— reducen el colesterol. Por eso, los consejos sobre nutrición en los años sesenta y setenta no insistían en la supresión total de grasas, sino en la sustitución de grasas saturadas por grasas poliinsaturadas. (De ahí resultó un consumo doble de lípidos poliinsaturados, que probablemente influyó mucho en el descenso a la mitad de las enfermedades coronarias durante los setenta y ochenta.)

La idea de que en general debe evitarse el consumo de grasas procede de observar que en los opulentos países occidentales la gran ingesta de grasas va acompañada de altos índices de enfermedades coronarias. Tal relación, sin embargo, se limita a las grasas saturadas. En sociedades donde se consumen grasas monoinsaturadas y poliinsaturadas en proporciones sustanciosas, las afecciones cardíacas tienden a disminuir (*véase la figura 1*). En la isla griega de Creta, por ejemplo, la dieta tradicional contiene gran cantidad de aceite de oliva (rico en grasas monoinsaturadas) y pescado (fuente de grasas poliinsaturadas). Aunque las grasas aportan el 40 % de las calorías de esa dieta, la tasa de patologías coronarias en quienes la siguen es incluso menor que en países como Japón, en cuya dieta tradicional las grasas sólo aportan del 8 al 10 por ciento de las calorías.



LA ANTIGUA PIRAMIDE DE LA ALIMENTACION concebida por el Departamento de Agricultura de EE.UU. proclamaba el mensaje de que desaconsejaba, por perjudiciales, los lípidos, para resaltar la bondad de los hidratos de carbono. Afirmaciones tan tajantes están ahora en tela de juicio.

USDA/DHHS (*antigua pirámide*)

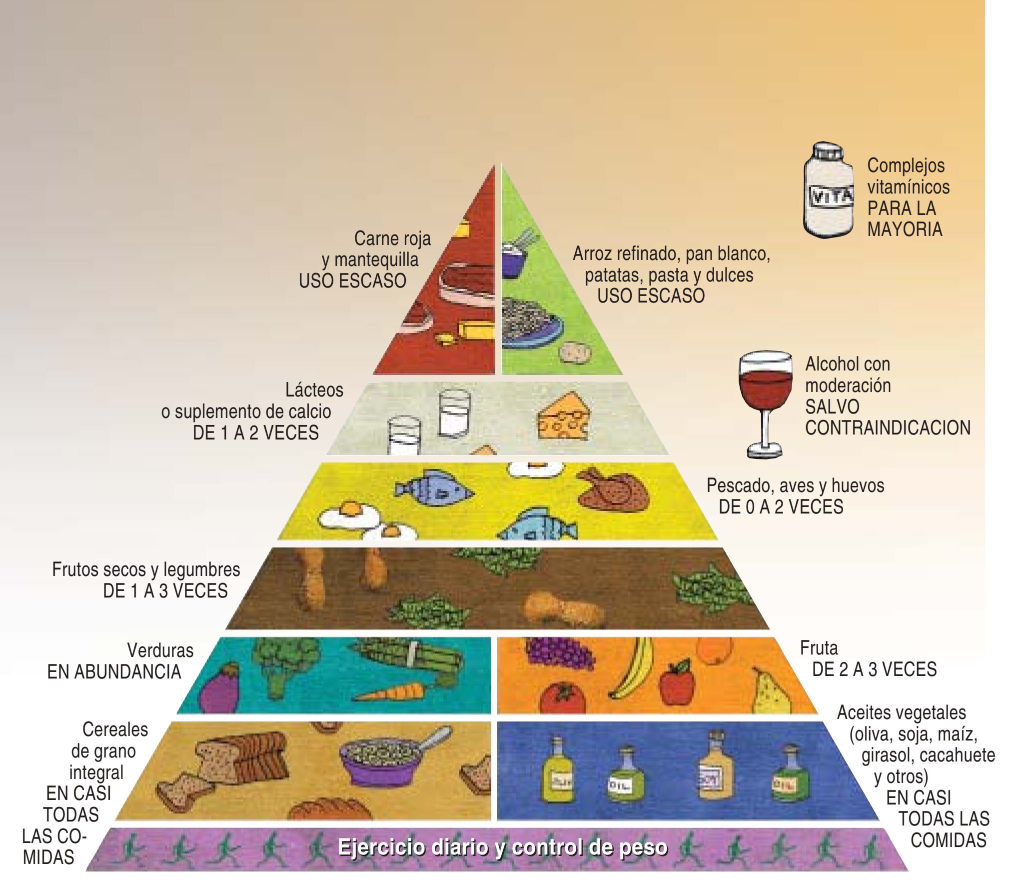
Por añadidura, las comparaciones internacionales pueden ser engañosas, pues gran número de factores que afectan negativamente a la salud, como el tabaco, la vida sedentaria y la obesidad, tienen que ver con el alto nivel de vida del mundo occidental.

Por desgracia, ante la dificultad de instruir al público en estas sutilezas, numerosos especialistas decidieron formular un solo mensaje, claro y sencillo: "las grasas son malas". Alrededor del 40 por ciento de todas las grasas consumidas en los Estados Unidos son saturadas: por ello, el USDA pensó que al recomendar una dieta baja en grasas se reduciría de modo natural la ingesta de grasas saturadas. La industria alimentaria pronto acudió en su apoyo, con galletas, aperitivos y otros productos de escaso contenido graso, pero que se acompañaban a menudo de edulcorantes muy ricos en fructosa.

Según los valores típicos de la pirámide de alimentación, los lípidos aportaban el 40 por ciento, las proteínas el 15 por ciento y los hidratos de carbono el 45 por ciento de las calorías consumidas por un norteamericano medio. No se quiso recomendar una mayor ingestión de proteínas, dado que muchos alimentos ricos en ellas, como las carnes rojas, también son fuertes en lípidos saturados. Por tanto, el lema que pregonaba la maldad de las grasas se completó con otro: "los

Resumen/*La pirámide guía de la alimentación*

- La pirámide elaborada en 1992 por el Departamento de Agricultura de EE.UU. para orientar la dieta recomendaba evitar los lípidos y comer alimentos ricos en hidratos de carbono, como pan, cereales, arroz y pasta. Se pretendía así reducir la ingesta de lípidos saturados, que elevan los niveles de colesterol.
- Se ha descubierto que un alto consumo de hidratos de carbono refinados, tales como el pan blanco y el arroz descascarillado, puede resultar desastroso para los niveles de glucosa y de insulina. De hecho, al sustituir esos hidratos de carbono por grasas saludables —monoinsaturadas o poliinsaturadas— disminuye el riesgo de afecciones cardíacas.
- Los especialistas en nutrición proponen ahora una nueva pirámide guía que recomienda consumir lípidos beneficiosos y cereales integrales pero evitar en lo posible los hidratos de carbono refinados, la mantequilla y las carnes rojas.



LA NUEVA PIRAMIDE DE LA ALIMENTACION original de los autores distingue entre tipos sanos y nocivos de lípidos e hidratos de carbono. Las frutas y verduras siguen siendo recomendadas, pero el consumo de productos lácteos deberá limitarse.

RICHARD BORGE

hidratos de carbono son buenos". Las directrices alimentarias de la Asociación de Cardiología y otros grupos recomendaban obtener de los hidratos de carbono al menos la mitad de las calorías, y no más del 30 por ciento de las grasas.

Tan arraigado ha estado ese límite del 30 por ciento entre los especialistas, que hasta los observadores perspicaces pudieron creer que había acreditados estudios donde se demostraba que los individuos con menos de ese nivel de ingestión de grasas disfrutaban de mejor salud que los que rebasaban ese valor. Pero no es verdad. Ninguna investigación atestigua que a largo plazo puedan atribuirse directamente beneficios sanitarios a una dieta baja en grasas. El límite del 30 por ciento carecía de apuntalamiento científico.

El valor de esta norma quedó aún más en entredicho al descubrirse que dos compuestos químicos que contienen colesterol —la lipoproteína de baja densidad (LDL), llamada vulgarmente "colesterol malo", y la lipoproteína de alta densidad (HDL) denominada "colesterol bueno"— ejercen efectos muy diferentes sobre el riesgo de enfermedades coronarias. Este riesgo crece al aumentar la relación de LDL a HDL en la sangre; disminuye cuando tal relación desciende. A principios de los noventa ya se había demostrado que, cuando una persona reemplaza las calorías procedentes de grasas saturadas por una cantidad igual de calorías obtenidas de hidratos de carbono, bajan los niveles de LDL y de colesterol total, pero también desciende el nivel de HDL. Como no varía la relación de LDL a HDL, el riesgo personal de cardiopatías sólo se reduce ligeramente. Por otro lado, el cambio a hidratos de carbono eleva los niveles en sangre de los triglicéridos, moléculas componentes de las grasas, probablemente debido a los efectos sobre el sistema endocrino del organismo. Los altos niveles de triglicéridos van también asociados a un fuerte riesgo de enfermedad cardíaca.

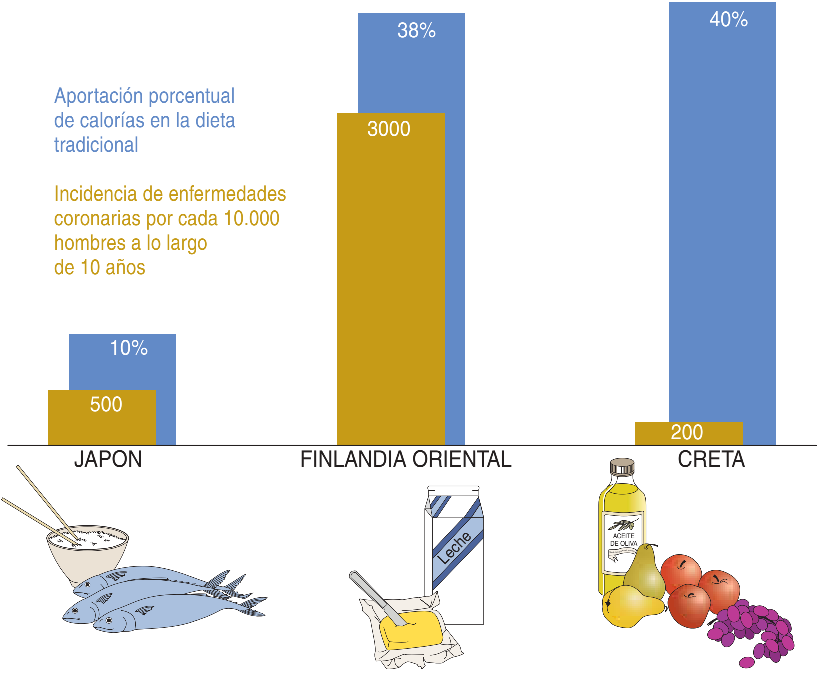
Los efectos son aún más lamentables cuando se pasa del consumo de lípidos monoinsaturados o poliinsaturados a la ingesta de hidratos de carbono. Suben los niveles de LDL y bajan los de HDL, lo cual empeora la relación de colesterol. Por el contrario, la sustitución de grasas saturadas por insaturadas (ya sean mono o poliinsaturadas) mejora dicha relación; cabe, pues, esperar que reduzca el riesgo de afección coronaria. Los únicos lípidos notablemente más perjudiciales que los hidratos de carbono son los ácidos grasos transinsaturados, producidos por una hidrogenación parcial del aceite líquido vegetal que le hace solidificarse. Este tipo de grasas transinsaturadas se encuentran en muchas margarinas, productos de panadería y frituras; son especialmente dañinas porque elevan el LDL y los triglicéridos, al tiempo que reducen el HDL.

El cuadro entero

Para evaluar plenamente los efectos de la dieta sobre la salud, es preciso mirar más allá de los niveles de triglicéridos y relaciones de colesterol. Los alimentos que ingerimos pueden afectar al corazón a través de muchos otros caminos, incluido el ascenso de la presión sanguínea o la mayor tendencia de coagulación de la sangre. Y hay otros alimentos capaces de prevenir enfermedades cardíacas por mecanismos sorprendentes; por ejemplo, los ácidos grasos omega-3 (presentes en pescados y en ciertos aceites vegetales) pueden reducir la probabilidad de fibrilación ventricular, alteración del ritmo cardíaco que produce muerte súbita.

El método ideal para evaluar todos estos efectos adversos y favorables sería la realización de ensayos a gran escala en los que se asignara aleatoriamente a los individuos una u otra dieta, observando los resultados durante muchos años. Por razones prácticas y económicas, han sido pocos los estudios de ese género; en su mayoría, además, se han dirigido a pacientes que ya sufren de afecciones cardíacas. Pese a su limitación, han confirmado la conveniencia de sustituir las grasas saturadas por

Las grasas y el corazón



1. LAS COMPARACIONES INTERNACIONALES revelan que el consumo total de lípidos es un mal indicador del riesgo de patología cardíaca. Lo que importa es el tipo de grasa que se toma. En regiones cuya dieta tradicional contiene muchos lípidos saturados, como al este de Finlandia, el índice de cardiopatías es mucho más alto que en lugares donde prevalecen los lípidos monoinsaturados (en Creta, por ejemplo). La dieta mediterránea de Creta, basada en aceite de oliva, es incluso mejor para el corazón que la dieta baja en grasas corriente en Japón.

CORNELIA BLIK

grasas poliinsaturadas, pero no por hidratos de carbono.

La mejor solución la ofrecen extensos estudios epidemiológicos, en los que se examinan periódicamente las dietas de muchas personas y se vigila el posible desarrollo en ellas de cardiopatías o enfermedades de otro tipo. Uno de los ejemplos más conocidos es el Estudio Sanitario de las Enfermeras, que se inició en 1976 para evaluar los efectos de los anticonceptivos orales, pero pronto se amplió para incluir la nutrición. Nuestro grupo de la Universidad de Harvard ha observado, en el marco de ese estudio, a unas 90.000 mujeres que empezaron contestando un cuestionario detallado sobre su dieta en 1980, así como a más de 50.000 varones inscritos en el Estudio de Seguimiento de Profesionales Sanitarios en 1986.

Tras ajustar el análisis para tener en cuenta el hábito de fumar, la vida sedentaria y otros factores de riesgo reconocidos, descubrimos que el tipo de grasas ingerido en la dieta ejercía un fuerte influjo en el riesgo cardíaco de los participantes. El consumo de grasas transinsaturadas aumentaba sensiblemente el riesgo, mientras que la ingestión de grasas saturadas sólo lo hacía ligeramente. Por el contrario, el consumo de grasas monoinsaturadas y poliinsaturadas era menos peligroso, justamente como predecían los estudios de nutrición controlados. Como estos dos efectos se contrarrestaban, el mayor consumo general de lípidos no provocaba una mayor incidencia de enfermedades coronarias. Este hallazgo vino a respaldar un informe de la Academia Nacional de Ciencias de 1989 donde se declaraba que el consumo total de lípidos, por sí solo, no comportaba riesgos de afección cardíaca.

Pero, ¿qué pasa con otras enfermedades? La alta incidencia de cánceres de mama, colon y próstata en los ricos países occidentales ha inducido a creer que el consumo de lípidos, y en especial la grasa animal, puede constituir un factor de riesgo. Sin embargo, en los grandes estudios epidemiológicos se aprecia escasa evidencia de que el consumo o la ingestión de determinados tipos de grasas durante los años de la madurez repercutan en el riesgo de cáncer de mama o de colon. Ciertos análisis indican que puede haber relación entre el cáncer de próstata y el consumo de grasas animales, pero es tranquilizador que no existan indicios de que los aceites vegetales aumenten el riesgo de ningún tipo de cáncer. Y más todavía, hay estudios que sugieren que los aceites vegetales pueden reducir ligeramente estos riesgos. En consecuencia, lo razonable es decidir sobre las grasas ingeridas en razón a sus efectos sobre las enfermedades cardiovasculares, no sobre el cáncer.

Debemos, en último término, considerar cómo repercute el consumo de grasas en la obesidad, un importante factor de riesgo para la diabetes de tipo 2 (también llamada diabetes del adulto), la enfermedad coronaria y los cánceres de mama, colon, riñón y esófago. Numerosos especialistas de nutrición creen que ingerir grasas contribuye a engordar, porque la grasa contiene más calorías por gramo que las proteínas o los hidratos de carbono. Además, el proceso de almacenar grasa de la alimentación en el cuerpo puede ser más eficiente que la conversión de los hidratos de carbono en grasa corporal. Pero unos estudios controlados recientes han demostrado que estas consideraciones carecen de relevancia práctica. Para evitar la obesidad, lo mejor es limitar el consumo de calorías total, no solamente el de lípidos. La cuestión crítica es entonces si el contenido en grasas de una dieta puede influir en la capacidad de autocontrolar la ingesta calórica. En otras palabras, ¿la ingestión de grasas nos deja más o menos hambrientos que la de proteínas o hidratos de carbono? Diversas teorías explican por qué una dieta reporta mayor beneficio que otra, pero lo cierto es que se han hecho pocos estudios a largo plazo. En pruebas aleatorias, los individuos a quienes se asignaron dietas bajas en grasas perdían algunos kilos durante los primeros meses, para recuperarlos luego. En estudios prolongados más allá de un año, tales dietas no han con-

seguido reducir el peso de un modo sistemático.

El consumo de hidratos de carbono

Examinemos ahora el efecto sobre la salud de los carbohidratos. Los hidratos de carbono complejos constan de largas cadenas de unidades de glúcidos, como la glucosa y la fructosa; los azúcares contienen una o dos unidades solamente. El hecho de que los azúcares sólo ofrezcan "calorías vacías" —carentes de vitaminas, minerales u otros nutrientes— determinó que los hidratos de carbono complejos constituyeran la base de la pirámide de alimentación de la USDA. Pero cuando éstos son refinados, como el pan blanco y el arroz, se descomponen con suma rapidez en glucosa, combustible esencial del organismo. El proceso refinador produce una forma fácilmente absorbible de almidón; además, elimina muchas vitaminas, minerales y fibra. Por consiguiente, estos hidratos de carbono elevan el nivel de glucosa en sangre más que los granos enteros, que no han sido molidos en harina fina.

Si hablamos de las patatas, estos tubérculos son casi íntegramente almidón y se metabolizan en glucosa con rapidez. Comer una patata hervida eleva más los niveles de azúcar en sangre que si esas mismas calorías proceden de azúcar de mesa. Este tipo de azúcar (sacarosa) es un disacárido compuesto por una molécula de glucosa y una molécula de fructosa. La fructosa tarda más en convertirse en glucosa, de ahí que el nivel de glucosa en sangre aumente con mayor lentitud.

El rápido incremento de azúcar en la sangre estimula una fuerte descarga de insulina, hormona que dirige la glucosa a los músculos y al hígado. Debido a esto, el azúcar en sangre cae bruscamente, a veces por debajo del nivel básico. Los niveles altos de glucosa e insulina pueden ejercer un efecto negativo en el estado cardiovascular, elevando los triglicéridos y disminuyendo el HDL (el colesterol "bueno"). En cambio, un descenso abrupto de la glucosa puede acentuar el hambre tras una pitanza rica en hidratos de carbono, contribuyendo así a comer en exceso y desarrollar obesidad.

De nuestros estudios epidemiológicos se desprende que una ingesta elevada de almidón procedente de granos refinados y patatas comporta un alto riesgo de diabetes de tipo 2 y de enfermedades coronarias. A la inversa, una alimentación rica en fibra se asocia a una menor incidencia de tales condiciones morbosas. Interesa saber, sin embargo, que el consumo de fibra no disminuye el riesgo de cáncer de colon como se había supuesto anteriormente.

Las personas de excesivo peso e inactivas pueden crear resistencia a los efectos de la insulina y, por ello, necesitar más cantidad de esta hormona para regular su nivel de azúcar en sangre. Hay pruebas recientes de que la respuesta metabólica adversa a los hidratos de carbono es sensiblemente peor entre las personas resistentes a la insulina. Este hallazgo explica por qué los campesinos de Asia y otras partes del mundo, delgados y activos en extremo, son capaces de consumir grandes cantidades de hidratos de carbono refinados sin sufrir diabetes ni cardiopatías, mientras que la misma dieta en poblaciones más sedentarias acarrea efectos devastadores.

Los autores

WALTER C. WILLETT y MEIR J. STAMPFER, docentes de la facultad de medicina de Harvard, son también profesores de epidemiología y nutrición en su Escuela de Salud Pública.

Las saludables verduras

Un alto consumo de frutas y verduras es quizás el aspecto menos discutible de la pirámide de alimentación. Se ha pregonado ampliamente que reducen el riesgo de cáncer. Pero esta ventaja se apoya en la historia de casos concretos, en los que se interroga sobre sus dietas anteriores a pacientes de cáncer escogidos. Los estudios retrospectivos admiten interpretaciones sesgadas, pero hay prospectivas detalladas (entre ellas la nuestra) en las que se aprecian muy escasas relaciones entre el consumo total de frutas y verduras y la incidencia de

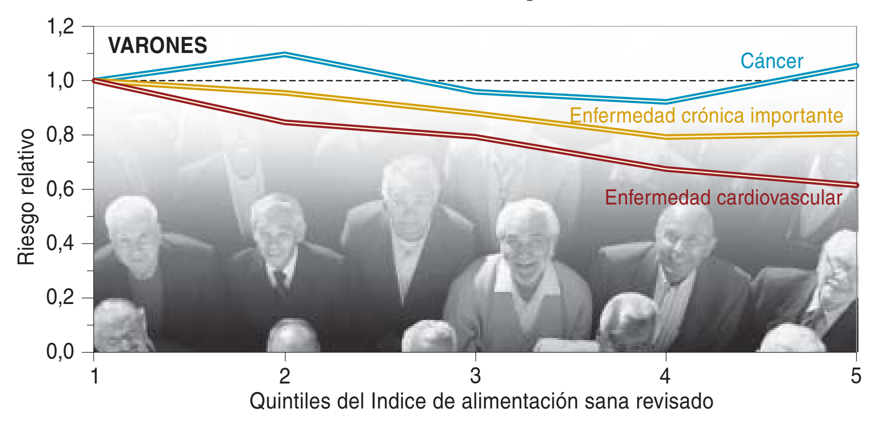


cáncer. (Bien es cierto que los nutrientes específicos de las frutas y verduras pueden ser beneficiosos; por ejemplo, el ácido fólico de las verduras de hoja verde, contra el cáncer de colon, y el licopeno presente en los tomates, contra el cáncer de próstata.)

El valor real de alimentarse con frutas y verduras tal vez sea la disminución del riesgo de enfermedades cardiovasculares. A este efecto contribuyen el ácido fólico y el potasio, según confirman los estudios epidemiológicos. Un consumo inadecuado de ácido fólico eleva también el riesgo de graves defectos congénitos; la escasez de luteína, pigmento de las verduras de hoja verde, se ha relacionado con un mayor peligro de cataratas y degeneración de la retina. Las frutas y verduras constituyen, además, la fuente primaria de muchas vitaminas necesarias para la buena salud. Hay, pues, muy buenas razones para consumirlas cinco veces al día aunque ello repercuta muy poco en el riesgo de cáncer. La inclusión de las patatas como verduras en la pirámide de alimentación tiene, empero, poco fundamento, ya que las patatas son esencialmente almidón y no presentan las saludables propiedades de otras verduras.

Otra imperfección de la pirámide es que no reconoce las importantes diferencias en materia de salud que existen entre la carne roja (vaca, cerdo y cordero) y otros alimentos del grupo de carnes y legumbres (aves, pescado, legumbres, huevos y frutos secos). El alto consumo de carne roja se ha venido asociando a un mayor riesgo de enfermedad coronaria, probablemente por su fuerte contenido de grasa saturada

Las virtudes de la nueva pirámide





2. PARA CALIBRAR LOS EFECTOS EN LA SALUD de las recomendaciones de la pirámide de alimentación revisada se examinaron los índices de afecciones cardíacas entre 67.271 mujeres (Estudio Sanitario de las Enfermeras) y 38.615 varones (Estudio de seguimiento de Profesionales Sanitarios). En los varones y mujeres del quinto quintil (el 20 por ciento cuya dieta se ajustaba más a lo prescrito en la pirámide) los índices de enfermedades cardiovasculares eran notablemente más bajos que en los del primer quintil (el 20 por ciento que se apartaban más de las recomendaciones). No se apreciaba, sin embargo, efecto alguno sobre el riesgo de cáncer.

KEN FISHER (*fotografía superior*) Y ED HONOWITZ (*fotografía inferior*) *Getty Images*; CORNELIA BLIK (*gráfica*)

y colesterol. La carne roja aumenta también el riesgo de diabetes de tipo 2 y de cáncer de colon. Este último puede en parte achacarse a los carcinógenos producidos al guisar y a las sustancias químicas presentes en las carnes preparadas, tales como el salami y el salchichón.

Las aves y pescados contienen, por el contrario, menos grasas saturadas y más grasas insaturadas que las carnes rojas. Además, el pescado es fuente abundante de los importantes ácidos grasos omega-3. No es de extrañar que se haya comprobado un riesgo menor de enfermedad coronaria y de cáncer de colon en gente que ha sustituido la carne roja por pollo y pescados. Los huevos son ricos en colesterol, pero el consumo máximo de uno al día no parece tener efectos adversos sobre la incidencia de afecciones cardíacas (excepto en los diabéticos), por la probable razón de que la ligera elevación del colesterol se halla compensada por otras ventajas nutritivas. Mucha gente evita los frutos secos por su alto contenido graso, pero estas grasas, incluso las de los cacahuetes, son en su mayor parte insaturadas. En las nueces, en particular, encontramos una buena fuente de ácidos omega-3. Los estudios de alimentación controlada demuestran que los frutos secos mejoran la relación de colesterol en la sangre; por otra parte disminuyen el riesgo de enfermedad cardíaca y de diabetes. Aparte de esto, los que comen frutos secos tienen realmente menos probabilidades de ser obesos, tal vez porque sacian más el apetito y eso reduce apreciablemente su capacidad de ingerir más alimentos.

La pirámide del USDA peca por recomendar un consumo excesivo de productos lácteos, equivalente a dos o tres vasos de leche al día. Tal consejo suele justificarse por su elevado contenido en calcio, que pretende prevenir la osteoporosis y las fracturas óseas. Ahora bien, los países de gran consumo de lácteos son los que dan el porcentaje de fracturas máximo; no cabe esperar un menor riesgo de fracturas por ingerir en abundancia tales productos. Del calcio, un nutriente esencial, se ha exagerado probablemente su importancia para la salud ósea. Por si fuera poco, no podemos asegurar que el alto consumo de lácteos carezca de riesgos: varios estudios han señalado que ese hábito va acompañado por un mayor riesgo de cáncer de próstata en los varones y una elevada incidencia de cáncer de ovarios en las mujeres. Aunque en principio se achacara tal efecto a los lípidos, análisis más detallados lo han desmentido. La elevada ingestión de calcio parece, por sí sola, guardar una relación muy clara con el riesgo de cáncer de próstata.

Aunque conviene investigar más sobre los efectos de los productos lácteos en la salud, de momento no parece prudente recomendar un consumo alto. La mayoría de los adultos que guardan un buen régimen alimentario pueden obtener la cantidad de calcio necesaria consumiendo el equivalente a un vaso de leche al día. Hay circunstancias, como después de la menopausia, en que puede necesitarse más calcio de lo normal, pero es posible tomarlo adicionalmente, sin grasas saturadas ni calorías y a un coste menor.

Una pirámide más sana

Aunque la pirámide de alimentación del USDA ha servido de norte durante los últimos 10 años, hasta hace muy poco no se disponía de datos sobre la salud de los individuos que han seguido sus recomendaciones. Probablemente ha sido beneficiosa, sobre todo por intensificar el consumo de frutas y

verduras y reducir la ingesta total de grasas, con lo cual habrá disminuido el consumo de los perjudiciales lípidos saturados y transinsaturados. No obstante, la pirámide podría también inducir un consumo menor de las saludables grasas insaturadas y mayor de los almidones refinados, lo que podría anular los beneficios anteriores.

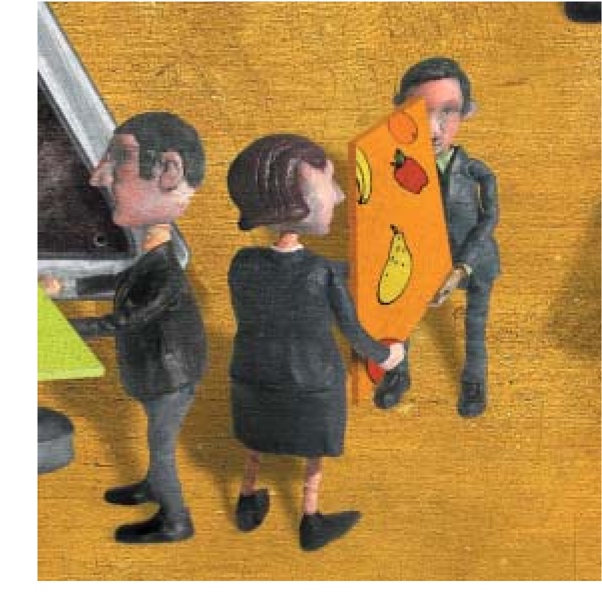
Para evaluar la repercusión total, nos hemos valido del Indice de alimentación sana (HEI, *healthy eating index*) creado por el USDA para medir el grado de adhesión a la pirámide y sus directrices anexas en los programas de nutrición. Partiendo de los datos recogidos en extensos estudios epidemiológicos, calculamos la puntuación alcanzada por cada participante en el HEI para examinar luego la relación de esas puntuaciones con el riesgo de enfermedades crónicas importantes (infarto, accidente cerebrosvascular, cáncer o muerte no traumática por una causa cualquiera). Comparando personas de los mismos grupos de edad, los varones y mujeres con puntuación HEI más elevada mostraban un menor riesgo de enfermedad crónica. Pero también es cierto que esas personas fumaban menos, hacían más ejercicio y, en general, llevaban una vida más sana que los demás participantes. Una vez compensadas tales variables, encontramos que una puntuación más alta en HEI no implicaba un estado de salud notablemente mejor. Como ya se había avanzado, los efectos nocivos del seguimiento de la pirámide contrarrestan los beneficiosos.

Puesto que la pirámide tiene una finalidad estimable —alentar la alimentación sana— hemos procurado ofrecer una alternativa deducida de los mejores datos disponibles. Nuestra pirámide revisada concede particular importancia al control del peso por medio del ejercicio diario y de la limitación del consumo total de calorías. Recomienda que el núcleo de la dieta consista en grasas sanas (aceites vegetales líquidos como los de oliva, maíz, soja, girasol y cacahuete) e hidratos de carbono sanos (pan de trigo integral, avena y arroz integral). Si lípidos e hidratos de carbono de la dieta son sanos, probablemente no hay que preocuparse demasiado del porcentaje en que cada grupo de alimentos contribuye a las calorías totales. También deben consumirse frutas y verduras en abundancia. Se aconseja una ingesta moderada de fuentes de proteínas sanas (frutos secos, verduras, pescado, aves y huevos); los productos lácteos deben limitarse a una o dos veces al día. Ha de reducirse al mínimo el consumo de carne roja, mantequilla, cereales refinados (pan blanco, arroz y pasta blanca), patatas y azúcar.

Las grasas transinsaturadas no aparecen en absoluto en la pirámide, pues no pueden formar parte de una dieta sana. Se sugiere tomar un complejo vitamínico. Puede considerarse aceptable el consumo moderado de alcohol (siempre que no esté contraindicado por razones de salud o medicaciones específicas). Esta última recomendación va acompañada de una advertencia: es mejor no beber nada de alcohol que beber demasiado. Sépase, sin embargo, que abundan los apoyos en pro de un consumo moderado de alcohol (en cualquier forma, vino, cerveza o licores) para el sistema cardiovascular.

¿Puede demostrarse que nuestra pirámide es más saludable que la del USDA? Hemos creado un nuevo HEI que mide el grado en que la dieta de una persona se ajusta a nuestras recomendaciones de nutrición. Aplicando este índice revisado, vimos que los varones y mujeres que se alimentaban de acuerdo con la nueva pirámide presentaban un menor riesgo de enfermedad cardíaca crónica (*véase la figura 2*). Tal beneficio se manifestaba en notables reducciones de los porcentajes de riesgo cardiovascular, hasta un 30 por ciento menos en mujeres y un 40 por ciento en varones. Sin embargo, el cumplimiento de las nuevas directrices de alimentación no iba acompañado por una menor incidencia de cáncer. El control de peso y la actividad física sí que disminuyen los riesgos de muchos tipos de cáncer.

Por supuesto, todavía planean incertidumbres sobre nuestra comprensión de las relaciones entre dieta y salud. Es preciso investigar más para examinar el papel de los productos lácteos, los efectos en la salud de ciertas frutas y verduras, los



pros y contras de los suplementos vitamínicos y el efecto a largo plazo de la dieta durante la infancia y la juventud. También ha de explorarse la interacción de los factores de la dieta con la predisposición genética, aunque su importancia queda por determinarse.

Otro reto más será el de garantizar que la información sobre alimentación dada al público se asiente en bases estrictamente científicas. El Departamento de Agricultura (USDA) quizá no sea el mejor organismo estatal para elaborar directrices de alimentación, dada su estrecha relación con la industria agrícola. La pirámide guía de la nutrición debe reconstruirse en un entorno que esté desligado de intereses políticos y económicos.

Bibliografía complementaria

PRIMARY PREVENTION OF CORONARY HEART DISEASE IN WOMEN THROUGH DIET AND LIFESTYLE. Meir J. Stampfer, Frank B. Hu, JoAnn E. Manson, Eric B. Rimm y Walter C. Willett, en *New England Journal of Medicine*, vol. 343, n.º 1, páginas 16-22; 6 de julio de 2000.

EAT, DRINK, AND BE HEALTHY: THE HARVARD MEDICAL SCHOOL GUIDE TO HEALTHY EATING. Walter C. Willett, P. J. Skerrett y Edward L. Giovannucci. Simon & Schuster, 2001.

DIETARY REFERENCE INTAKES FOR ENERGY, CARBOHYDRATES, FIBER, FAT, PROTEIN AND AMINOACIDS MACRONUTRIENTS. Food and Nutrition Board, Institute of Medicine, National Academy of Sciences. National Academies Press, 2002.

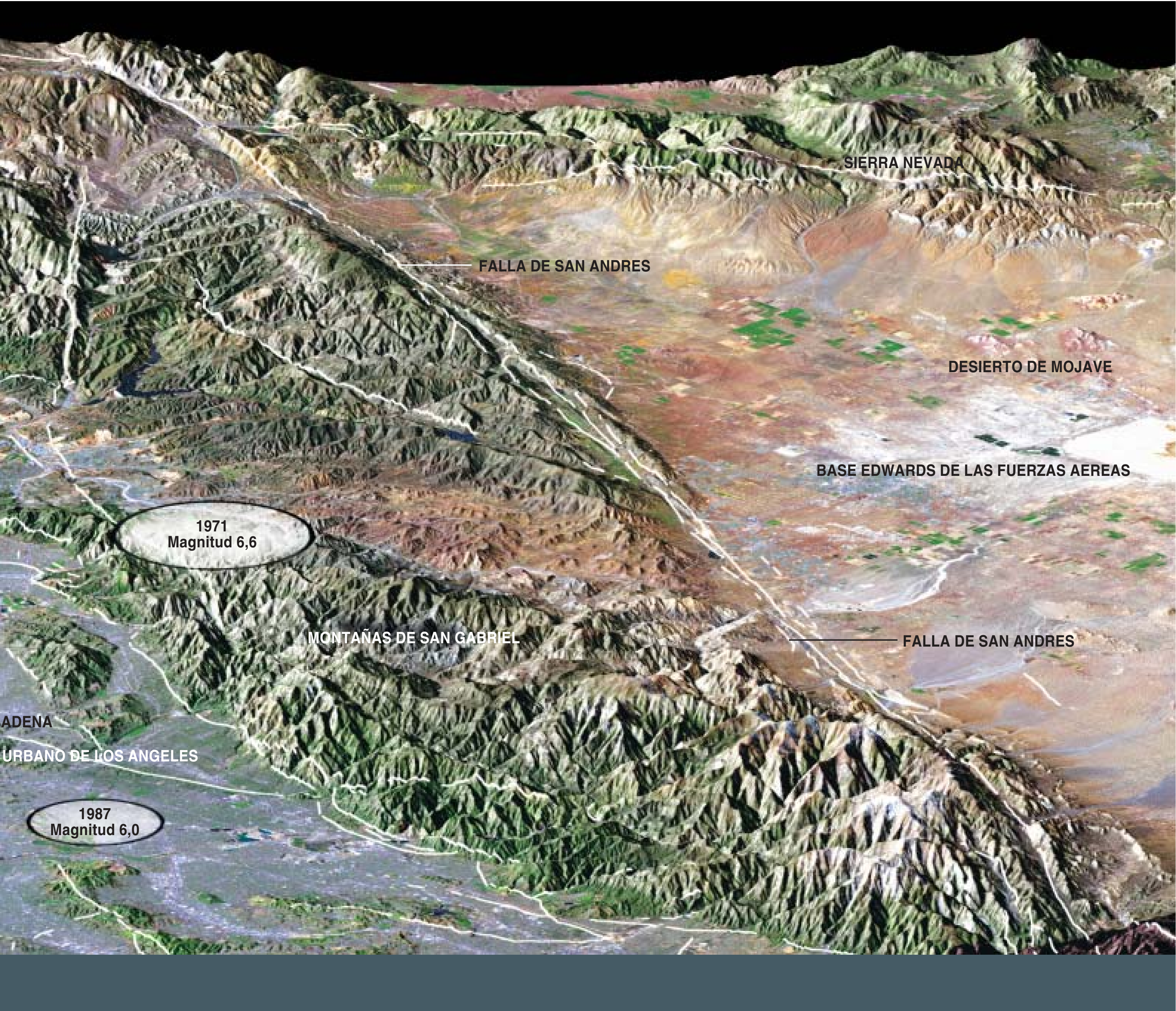


TRECE MILLONES DE PERSONAS de Los Angeles y sus alrededores viven en medio de una complicada red de fallas propicias a los terremotos (*líneas blancas*), entre ellas la famosa de San Andrés. Algunos científicos creen ahora que cada uno de los seísmos importantes que han sacudido la región desde el decenio de 1850 (*óvalos*) probablemente influyeron en el momento de producirse y en la localización de los subsiguientes.

Concatenaciones sísmicas

Frente a la concepción predominante, los grandes terremotos pueden interactuar de muchas maneras, algunas inesperadas. Este apasionante descubrimiento podría mejorar nuestra capacidad predictiva de futuros seísmos

Ross S. Stein



ROBERT E. CRIPPEN *Laboratorio de Propulsión a Chorro*

Durante decenios han soñado los sismólogos con predecir el instante y lugar del próximo terremoto catastrófico. Pero hacia principios del decenio de 1990 habían visto tal complejidad en el comportamiento de las fallas susceptibles de originar seísmos, que llegaron a la conclusión de que los mayores temblores del planeta son sucesos aislados, aleatorios e imprevisibles. La mayoría acepta ahora que una vez un gran terremoto y sus esperadas réplicas han causado la destrucción correspondiente, la falla permanecerá en reposo hasta que se recuperen las tensiones de la corteza terrestre, de ordinario a lo largo de centenares o millares de años. Pero un descubrimiento reciente —que los seísmos se concatenan de maneras nunca antes imaginadas— está socavando esta hipótesis.

Los nuevos conocimientos corroboran la idea de que una conmoción de gran magnitud alivia tensiones —y por tanto reduce la probabilidad de un segundo temblor importante— en algunas áreas. Pero también indican que la probabilidad de un segundo terremoto en otro lugar a lo largo de la falla o en una falla próxima puede hasta triplicarse de repente. Para los responsables de la asistencia médica de urgencia o para los actuarios, estas predicciones más refinadas serían de la mayor importancia a la hora de determinar la vulnerabilidad de una población.

Esta hipótesis —denominada “desencadenamiento por tensiones”— se funda en la inesperada sensibilidad que hoy sabemos tienen las fallas a las sutiles tensiones que padecen cuando fallas vecinas se mueven y tiemblan. Basándose en los registros de terremotos anteriores y en nuevos cálculos sobre el comportamiento de las fallas, mis compañeros y yo hemos comprendido que la tensión liberada durante un terremoto no se disipa sin más, sino que se transmite a lo largo de la falla y se concentra en puntos próximos. Este incremento brusco de la tensión causa nuevos temblores. El estudio, emprendido en 1992, de unas dos docenas de fallas nos ha convencido a muchos de que se puede provocar un terremoto, aun cuando la tensión se incremente sólo en un octavo de la presión necesaria para inflar el neumático de un turismo.

No se admitían tan delicadas relaciones entre causa y efecto en los grandes seísmos; nunca desempeñaron un papel en la predicción de terremotos. Es comprensible que muchos duden de que la predicción pueda basarse en ellas. No obstante, la hipótesis del desencadenamiento de tensiones ha seguido ganando credibilidad gracias a que explica la localización y frecuencia de terremotos que siguieron a varios seísmos destructivos en California, Japón y Turquía. La esperanza de prevenir mejor tales desastres es la motivación principal de nuestra búsqueda de una interpretación de esas inesperadas concatenaciones entre terremotos.

Réplicas ignoradas

Contradecir la teoría de que los terremotos importantes se producían al azar era arriesgado desde el principio, especialmente considerando que cientos de científicos habían tratado sin éxito de hallar caracteres predecibles en la actividad global de los terremotos. Algunos investigadores buscaban ritmos cambiantes de los pequeños temblores o usaban instrumentos sensibles para medir la corteza terrestre cuando se inclina, se estira y se mueve a lo largo de distancias invisibles para el ojo. Otros siguieron los movimientos subterráneos de gases, fluidos y energía electromagnética, o vigilaron diminutas grietas en las rocas para ver si se abren o cierran antes de los grandes seísmos. Se investigara lo que se investigara, no se halló interrelación entre terremotos.

Pese a tales disparidades, los registros históricos confirman que un tercio de los temblores —las réplicas— se agrupan en el espacio y en el tiempo. Se creía que todas las réplicas auténticas se producían en algún punto del segmento de la falla que se deslizó durante el terremoto principal. El momento en que se producían también sigue un patrón rutinario, según las observaciones del sismólogo japonés Fusakichi Omori, enunciadas en 1894 y sintetizadas después en un principio básico, la ley de Omori. Las réplicas abundan más justo después del seísmo principal. Diez días después, el ritmo de réplicas desciende a un 10 por ciento del inicial, cien días después cae al 1 por ciento, y así sucesivamente. Este previsible aumento y descenso de la sismicidad significa que un temblor inicial modifica la corteza terrestre para favorecer la posibilidad de otros sucesivos, en contra de la idea de que los terremotos se producen al azar en el tiempo. Pero como las réplicas se caracterizan por ser de menor intensidad que los terremotos, durante mucho tiempo no se les prestó la atención debida.

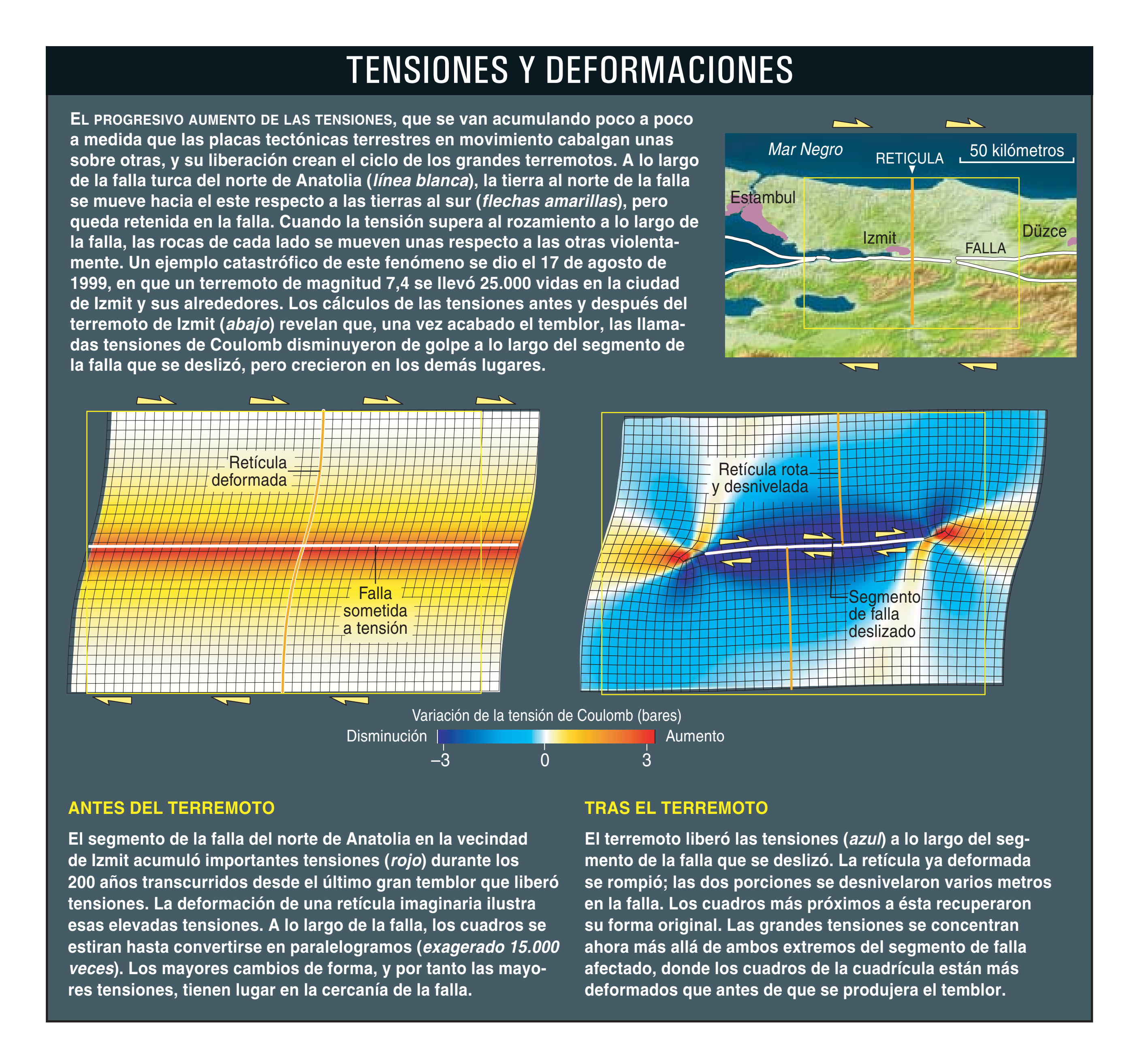
Una vez desechadas las réplicas, los demás temblores parecían distribuirse al azar. Pero, ¿por qué ignorar los terremotos más previsibles para demostrar que el resto carece de orden alguno? Mis compañeros y yo, en cambio, nos empeñamos en buscar la causa de la regularidad de las réplicas. Comenzamos nuestra indagación en una de las regiones del mundo de mayor actividad sísmica: el sistema de la falla de San Andrés, que recorre California. Por los registros locales de terremotos y réplicas, sabíamos que al día siguiente de un suceso de magnitud 7,3 la probabilidad de que se produjera otro gran terremoto en un radio de 100 kilómetros era casi del 67 por ciento: 20.000 veces la probabilidad en cualquier otro día. Algo ocurría en el primer temblor que parecía incrementar muchísimo la probabilidad de los subsiguientes; pero, ¿qué?

Ese gran salto en la probabilidad explicaba que en junio de 1992 a nadie le sorprendiese que hubiera un terremoto de magnitud 6,5 cerca de la ciudad de Big Bear, en el sur de California, sólo tres horas después de desencadenarse un terremoto de magnitud 7,3 a 40 kilómetros de distancia, cerca de Landers. (Afortunadamente, los dos sucesos se produjeron en el desierto y dejaron la ciudad de Los Angeles intacta). Contra la tesis aceptada, el seísmo de Big Bear ocurrió lejos de la falla que se había deslizado en las sacudidas de Landers. El temblor de Big Bear se ajustaba a lo que cabía esperar de una réplica en punto al tiempo, pero no en cuanto a su situación. Sospechamos que su misteriosa ubicación podría encerrar la clave que andábamos buscando.

Al cartografiar las posiciones de Landers, Big Bear y cientos de otros terremotos californianos, fuimos observando una notable regularidad en la distribución no sólo de réplicas genuinas, sino también de otros terremotos menores que siguen a la sacudida principal en días, semanas e incluso años. Lo mismo que el enigmático suceso de Big Bear, una gran mayoría de

Resumen/*Prioridades cambiantes*

- Se creía que los grandes terremotos no influían en el momento de aparición o la localización del siguiente. Un nuevo y sorprendente descubrimiento cuestiona ese postulado.
- Las fallas propensas a engendrar terremotos muestran una inesperada sensibilidad a las pequeñas tensiones que actúan sobre ellas durante los temblores de fallas próximas.
- A igualdad de las demás circunstancias, en las regiones de la corteza terrestre donde las tensiones aumenten —incluso en pequeña cuantía— se producirán los próximos terremotos.
- Si esta hipótesis se confirma, cabría mejorar mucho la capacidad de evaluar su vulnerabilidad sísmica.



TENSIONES Y DEFORMACIONES

El progresivo aumento de las tensiones, que se van acumulando poco a poco a medida que las placas tectónicas terrestres en movimiento cabalgan unas sobre otras, y su liberación crean el ciclo de los grandes terremotos. A lo largo de la falla turca del norte de Anatolia (*línea blanca*), la tierra al norte de la falla se mueve hacia el este respecto a las tierras al sur (*flechas amarillas*), pero queda retenida en la falla. Cuando la tensión supera al rozamiento a lo largo de la falla, las rocas de cada lado se mueven unas respecto a las otras violentamente. Un ejemplo catastrófico de este fenómeno se dio el 17 de agosto de 1999, en que un terremoto de magnitud 7,4 se llevó 25.000 vidas en la ciudad de Izmit y sus alrededores. Los cálculos de las tensiones antes y después del terremoto de Izmit (*abajo*) revelan que, una vez acabado el temblor, las llamadas tensiones de Coulomb disminuyeron de golpe a lo largo del segmento de la falla que se deslizó, pero crecieron en los demás lugares.

ANTES DEL TERREMOTO

El segmento de la falla del norte de Anatolia en la vecindad de Izmit acumuló importantes tensiones (*rojo*) durante los 200 años transcurridos desde el último gran temblor que liberó tensiones. La deformación de una retícula imaginaria ilustra esas elevadas tensiones. A lo largo de la falla, los cuadros se estiran hasta convertirse en paralelogramos (*exagerado 15.000 veces*). Los mayores cambios de forma, y por tanto las mayores tensiones, tienen lugar en la cercanía de la falla.

TRAS EL TERREMOTO

El terremoto liberó las tensiones (*azul*) a lo largo del segmento de la falla que se deslizó. La retícula ya deformada se rompió; las dos porciones se desnivelaron varios metros en la falla. Los cuadros más próximos a ésta recuperaron su forma original. Las grandes tensiones se concentran ahora más allá de ambos extremos del segmento de falla afectado, donde los cuadros de la cuadrícula están más deformados que antes de que se produjera el temblor.

SERKAN BOZKURT *Servicio de Inspección Geológica de los EE.UU.*

esos temblores subsiguientes tendían a agruparse en áreas alejadas de la falla que se deslizó durante el terremoto y, por tanto, lejos de donde se suponía habían de producirse las réplicas. Si pudiéramos determinar qué controlaba esta distribución, razonábamos, las mismas características podrían también aplicarse a los propios terremotos principales. Y si esto resultaba cierto, quizás estuviésemos en el buen camino para idear una nueva estrategia sobre la predicción de terremotos.

Desencadenantes y sombras

Empezamos por buscar cambios en la corteza terrestre tras un terremoto importante, que libera parte de las tensiones que se van acumulando cuando las placas tectónicas móviles del planeta cabalgan unas sobre otras. A lo largo de la falla de San Andrés, por ejemplo, la placa que transporta Norteamérica se mueve hacia el sur respecto a la que subyace bajo el océano Pacífico. Al moverse los dos lados en sentido opuesto, se ejerce una tensión de cizalladura, paralela al plano de la falla. Conforme las rocas de los lados opuestos de la falla presionan unas contra las otras, ejercen una segunda tensión, perpendicular al plano de la falla. Cuando la cizalladura supera la resistencia de rozamiento en la falla, o cuando la tensión que oprime un lado de la falla contra el otro se relaja, las rocas de cada lado se deslizan bruscamente unas respecto a las otras; se libera entonces una enorme energía en forma de terremoto. Ambos componentes de la tensión, cuya suma recibe el nombre de tensión de Coulomb, disminuyen a lo largo del segmento de la falla deslizante. Ahora bien, la tensión no puede desaparecer sin más; sabíamos que habría de redistribuirse por otros puntos a lo largo de la misma falla o por otras fallas vecinas. También sospechábamos que el aumento de la tensión de Coulomb podría bastar para desencadenar terremotos en esos nuevos lugares.

Tensiones y predicciones

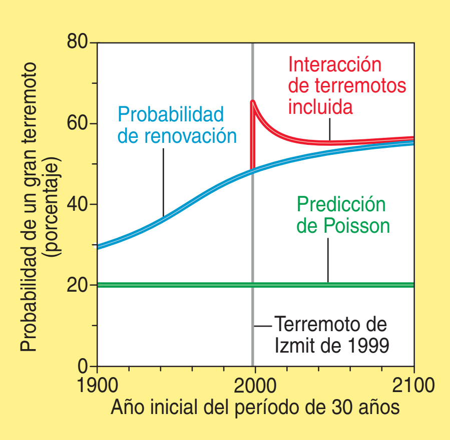
Se desconocen todavía numerosas características del comportamiento de los terremotos. Nos vemos obligados a movernos en el terreno de la probabilidad.

La percepción de la amenaza de un terremoto depende en muy buena medida de las previsiones difundidas. La mayoría de las predicciones sísmicas actuales presuponen que un terremoto carece de relación con el siguiente. Se parte de que cada segmento de falla tiene un período medio de tiempo entre terremotos de una magnitud determinada (cuanto mayor el terremoto, más largo el período, por ejemplo), pero se cree que el momento concreto en que ocurrirán es aleatorio. Este método —una probabilidad de Poisson— permite predecir sin que haya que saber cuándo se produjo el último terremoto importante. A los sismólogos les basta con inferir el intervalo de tiempo típico entre terremotos importantes; para ello se basan en archivos geológicos de seísmos mucho más antiguos sucedidos a lo largo de aquel segmento de la falla. Esta estrategia conservadora da por resultado probabilidades que no varían con el tiempo.

En contraste, un tipo de predicción más refinado, la probabilidad de renovación, predice que el riesgo de un temblor devastador aumenta con el tiempo transcurrido desde que se produjo el último. Esas probabilidades crecientes se fundan en una hipótesis: la tensión a lo largo de una falla aumenta gradualmente después de un terremoto importante. Mis colaboradores y yo construimos las probabilidades asociadas con las interacciones de terremotos por medio de esta técnica tradicional, pero incluimos los efectos de las variaciones, debidas a terremotos próximos, de las tensiones. La comparación de los tres tipos de predicciones para la falla turca del norte de Anatolia, cerca de Estambul, ilustra las diferencias existentes entre ellas, más notables después de un gran temblor.

En los años anteriores al catastrófico terremoto que padeció Izmit en agosto de 1999, la probabilidad de renovación de un temblor de magnitud 7 o mayor en las cuatro fallas situadas a menos de 50 kilómetros de Estambul había ido aumentando lentamente desde el último gran terremoto que afectó a cada una de ellas, hace entre 100 y 500 años. De acuerdo con esta clase de predicción, el temblor de agosto creó una brusca caída en la probabilidad de un segundo temblor importante en la vecindad de Izmit, porque se creía que las fallas se habían relajado allí. Pero el temblor no alteró la probabilidad, un 48 por ciento, de un fuerte temblor 100 kilómetros al oeste, en Estambul, en los próximos 30 años. Esas probabilidades continuarán creciendo poco a poco con el tiempo, a diferencia de la probabilidad de Poisson, que se mantendrá en sólo el 20 por ciento, haya o no otros temblores en la capital.

Cuando los efectos de la nueva hipótesis de mi grupo, el desencadenamiento de tensiones, se añadieron a la probabilidad de renovación, todo cambió. El resultado más espectacular fue el brusco aumento de la probabilidad de que un segundo terremoto sacuda Estambul: algunas de las tensiones liberadas cerca de Izmit durante el temblor de 1999 se desplazaron hacia el oeste a lo largo de la falla y se concentraron cerca de la ciudad; por esa razón, el temblor de Izmit elevó la probabilidad de un terremoto en Estambul en los próximos 30 años de un 48 por ciento a un 62 por ciento. Esta "probabilidad de la interacción" decrecerá con el tiempo a medida que la probabilidad de renovación aumente. Las dos predicciones convergerán en aproximadamente un 54 por ciento en el año 2060, suponiendo que el próximo terremoto importante no se produzca antes.



1. LA PROBABILIDAD PREVISTA de que se produzca un gran terremoto a menos de 50 kilómetros de Estambul puede variar mucho. El riesgo, que se mantiene constante o aumenta poco a poco con el tiempo en las predicciones tradicionales (*verde y azul*), salta apreciablemente cuando se incluyen las tensiones comunicadas durante el terremoto de Izmit de 1999 (*rojo*).



2. EFECTOS DEVASTADORES del terremoto ocurrido en noviembre de 1999 en Düzce. Se sospecha que este desastre fue desencadenado por un temblor anterior, cerca de Izmit.

CORNELIA BLIK (*gráfico*); AFB Corbis (*fotografía*)

Los geofísicos llevaban muchos años calculando tensiones de Coulomb, pero nunca se apoyaron en ellas para explicar la sismicidad. Su planteamiento era harto elemental: suponían que los cambios insignificantes serían incapaces de introducir diferencias apreciables. Verdad es que la cantidad de tensión transferida es, en general, muy pequeña: menos de 3,0 bar o, como máximo, un diez por ciento de la variación total de la tensión que las fallas sufren durante un terremoto. Tenía mis dudas de que esto bastara para desencadenar el deslizamiento de una falla. Pero cuando Geoffrey King, del Instituto Geofísico de París, Jian Lin, de la Institución Woods Hole de Oceanografía, y yo calculamos las áreas en California meridional donde la tensión había aumentado después de un terremoto importante, quedamos sorprendidos al ver que los aumentos, aunque pequeños, coincidían con los lugares donde se habían agrupado los temblores sucesivos. Las implicaciones de estas correlaciones eran inequívocas: las regiones donde aumentan las tensiones albergarán la mayoría de los temblores venideros, grandes o chicos. Comenzamos a ver algo no menos sorprendente: ligeras rebajas de las tensiones inhibirían futuros seísmos. En nuestros mapas, la actividad sísmica caía bruscamente en esas "sombras de tensión".

El análisis de las tensiones de Coulomb explicaba la ubicación de ciertos terremotos en el pasado. Pero una prueba más exigente consistiría en comprobar si esta nueva técnica pronosticaba de manera fidedigna los centros de *futuros* terremotos. Hace seis años, me agregué al equipo de James H. Dieterich, de la Inspección Geológica de los EE.UU., y a Aykut A. Barka, de la Universidad Técnica de Estambul, para estudiar la falla del norte de Anatolia, una de las zonas de falla más pobladas del mundo. Basándonos en nuestros cálculos relativos a los lugares donde habían aumentado las tensiones de Coulomb como resultado de pasados terremotos, estimamos que había una probabilidad del 12 por ciento de que un terremoto de magnitud 7 o mayor afectase al segmento de la falla próximo a la ciudad de Izmit entre 1997 y 2027. Parecerá bastante baja, pero en comparación, todos menos uno de los otros segmentos de la falla de 1000 kilómetros de longitud mostraban probabilidades de sólo 1 o 2 por ciento.

No tuvimos que esperar mucho para obtener la confirmación. En agosto de 1999, un terremoto de magnitud 7,4 devastó Izmit, matando 25.000 personas y destruyendo propiedades por valor de más de seis mil millones de euros. Pero este seísmo fue sólo el más reciente de una secuencia de 12 importantes que, a manera de la caída de fichas de dominó, llevaban asolando la región de la falla del norte de Anatolia desde 1939. En los cinco años más brutales, cuatro terremotos hicieron que los 700 kilómetros de la falla se deslizaran en fatal progresión hacia el oeste. A nuestro entender las tensiones transferidas más allá del final de cada ruptura desencadenaban el seísmo siguiente, incluido el de Izmit.

En noviembre de 1999 cayó la decimotercera ficha de dominó. Parte de las tensiones de Coulomb que se habían desviado del segmento de la falla próximo a Izmit desencadenaron un terremoto de magnitud 7,1 cerca de la ciudad de Düzce, unos 100 kilómetros al este. Afortunadamente, Barka había calculado el aumento de la tensión resultante de la sacudida de Izmit y lo había publicado en la revista *Science*, dos meses antes. Con el anuncio de Barka, los ingenieros cerraron los edificios escolares de Düzce que habían sufrido ligeros daños con el primer seísmo, pese a las protestas de los funcionarios que alegaban que los alumnos no tenían ningún otro sitio donde reunirse para sus clases. El seísmo de noviembre derribó alguno de esos edificios.

Si los subsiguientes cálculos de Parsons, Shinji Toda, Barka, Dieterich y míos se ajustan a la verdad, quizá no sea ésa la última réplica del terremoto de Izmit. La tensión transferida durante ese seísmo ha elevado también la probabilidad de fuertes sacudidas en la cercana capital, Estambul, en este año, de 1,9 a 4,2 por ciento. A lo largo de los próximos 30 años, estimamos que esa probabilidad subirá al 62 por ciento; si atribuyéramos los grandes seísmos al azar, la probabilidad sería sólo del 20 por ciento.

La hipótesis del desencadenamiento de tensiones ofrece algún consuelo junto a tanta oscuridad y sufrimiento. Cuando la alerta se aviva en ciertas regiones, el peligro inevitablemente desciende para otras. En Turquía, las regiones menos inquietantes están menos pobladas que Estambul. Pero a veces sucede lo contrario. Uno de los ejemplos más llamativos es la relativa falta de sismicidad que la región de la bahía de San Francisco, ahora la residencia de cinco millones de personas, ha experimentado desde el gran terremoto de magnitud 7,9 de 1906. El análisis que realizaron en 1998 Ruth A. Harris y Robert W. Simpson mostró que la sombra de tensiones del seísmo de 1906 cruzaba varios ramales paralelos de la falla de San Andrés en la zona de la bahía, mientras que el aumento de la tensión se registraba en el norte y el sur. Esto podría explicar por qué el ritmo a que sucedieron seísmos devastadores en la zona de la bahía descendió un orden de magnitud, si se comparaba con los 75 años anteriores a 1906. Se calcula que la sismicidad en la zona de la bahía saldrá lentamente de esta sombra a medida que se vuelven a acumular tensiones en las fallas; las autopistas destruidas y demás daños causados por el terremoto de 1989 de Loma Prieta quizás anuncien ese nuevo despertar.

Corroboraciones de la hipótesis

El examen de los terremotos de Turquía y del sur de California reforzó lo que aseverábamos: que bastan pequeñas variaciones en las tensiones para engendrar grandes efectos, tanto apaciguadores como ca-

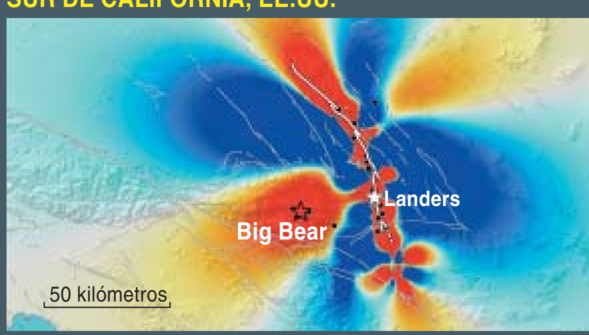
El autor

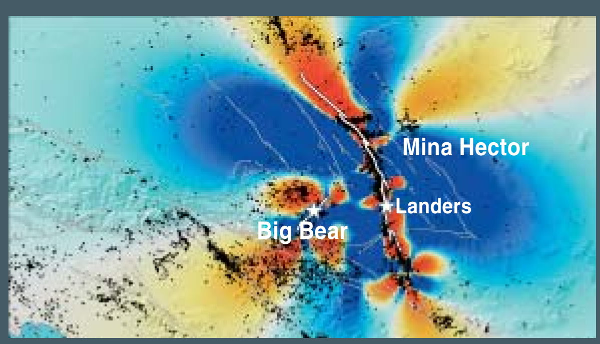
ROSS S. STEIN es geofísico del Servicio de Inspección Geológica de los Estados Unidos. Por los trabajos resumidos en este artículo, recibió el Premio Eugene M. Shoemaker en el año 2000.

CONCENTRACION DE TERREMOTOS

En los lugares donde las tensiones han aumentado bruscamente (*rojo*) después de un terremoto importante (*estrellas llenas*) suelen desencadenar más tarde temblores, grandes (*estrellas vacías*) y pequeños (*puntos negros*). Por el contrario, pocos terremotos tienen lugar donde las tensiones disminuyen mucho (*azul*), sea cual sea la posición de las fallas vecinas (*líneas blancas*).

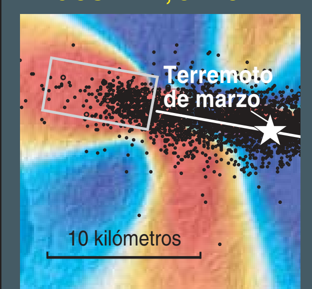
SUR DE CALIFORNIA, EE.UU.

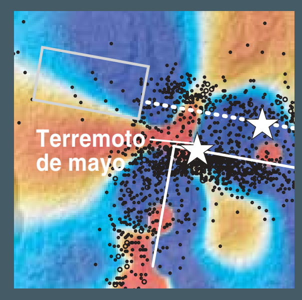




EL TERREMOTO DE MAGNITUD 7,3 que se produjo en el desierto del sur de California cerca de Landers, en 1992, incrementó la cadencia esperada de terremotos hacia el sudoeste, donde el temblor de magnitud 6,5 de Big Bear tuvo lugar tres horas más tarde (*arriba*). Las tensiones transmitidas por la combinación de los episodios de Landers y Big Bear coincidieron con las regiones donde se concentró la mayoría de los terremotos de los siete años siguientes, culminando con el terremoto de la Mina Hector, de magnitud 7,1, en 1999 (*abajo*).

KAGOSHIMA, JAPON





DOS TERREMOTOS GEMELOS pueden alterar la frecuencia de los terremotos, o sismicidad, aumentándola o reduciéndola en el mismo lugar. En 1997, un temblor de magnitud 6,5 aumentó las tensiones y la sismicidad al oeste de la falla quebrada (*arriba, izquierda*). La sismicidad cayó en esa región, junto con las tensiones (*arriba, derecha*), tras un temblor de magnitud 6,3 sucedido 48 días más tarde tres kilómetros al sur.

SERKAN BOZKURT *USGS*, KEITH RICHARDS-DINGER *Marina de EE.UU.* Y SHINJI TODA *Centro de Estudios de Fallas Activas, Japón*

tastróficos. Ahora bien, pese al creciente número de ejemplos de que disponíamos para apoyar esta idea, había un punto clave difícil de explicar: alrededor de una cuarta parte de los terremotos que examinamos tuvieron lugar en zonas donde habían *disminuido* las tensiones. Fácil les era a nuestros colegas más escépticos razonar que no debería haber habido sismicidad en esas regiones de sombra; la sacudida principal habría aliviado al menos parte de la tensión y alejado así todavía más de la fractura esos segmentos de la falla. Ahora tenemos una respuesta. La sismicidad nunca se anula por completo en las zonas de sombra ni, a su vez, actúa de lleno en las zonas desencadenantes. El *cociente de sismicidad* —el número de terremotos por unidad de tiempo— sólo desciende en las sombras o aumenta en las zonas de desencadenamiento, con respecto a la actividad previa de la región.

Debemos esta ampliación de la hipótesis del desencadenamiento de tensiones a un concepto definido por Dieterich en 1994: la fricción de actividad/estado. Esa tesis echa por tierra la idea de que el rozamiento es una propiedad que sólo puede variar entre dos valores: alto cuando el material se mantiene estacionario, bajo cuando está deslizando. Muy al contrario, las fallas pueden hacerse más adhesivas o más resbaladizas a medida que la velocidad del movimiento cambia en el curso de la misma y la historia del movimiento, o estado, progresa. Se llegó a estas conclusiones a partir de experimentos de laboratorio en los que el grupo de Dieterich aserró una falla en miniatura en un bloque de granito del tamaño de un utilitario y desencadenó en ella diminutos terremotos.

Cuando el comportamiento de los terremotos se calcula con la fricción como una variable, y no como valor fijo, queda claro que la ley de Omori es una propiedad fundamental no sólo de las réplicas, sino de *todos* los terremotos. Predice la ley que la frecuencia en que ocurren los seísmos salta bruscamente al principio y luego disminuye con el tiempo; explica así por qué una región no retiene para siempre la elevada tasa de sismicidad resultante de un aumento de la tensión. Pero ésta es sólo la mitad de la historia. La teoría de Dieterich revela una característica de la sismicidad que escapa por completo a la ley de Omori. En zonas donde un temblor principal libera tensiones, la tasa de sismicidad se hunde inmediatamente, pero retornará poco a poco a los valores anteriores al temblor y de manera predecible. Quizá parezcan sutilezas, pero gracias a la fricción de actividad/estado predecimos por primera vez cómo cambiarían con el tiempo los saltos o disminuciones de la sismicidad. Cuando se calculaban solamente las tensiones de Coulomb, podíamos definir la localización general de nuevos terremotos, pero no su cadencia.

Las ideas que íbamos definiendo acerca del punto y el instante en que sucederían terremotos desencadenados por las tensiones quedaron ulteriormente confirmadas por un estudio mundial realizado a principios del año pasado. Parsons consideró los más de 100 terremotos de magnitudes 7, o superiores, ocurridos en todo el mundo en los últimos 25 años y examinó cada una de las réplicas de magnitud 5 o mayor dentro de

un radio de 250 kilómetros alrededor del suceso de magnitud 7. Entre los más de 2000 temblores de este inventario, el 61 por ciento tuvo lugar en puntos donde un temblor anterior había aumentado la tensión, aun cuando fuera en pequeña cuantía. De esos seísmos provocados muy pocos caían tan cerca del terremoto principal como para que se los considerase réplicas; en todos los casos el ritmo de los temblores provocados disminuyó en el período de tiempo predicho por la fricción de actividad/estado y la ley de Omori.

Ahora, al aplicar de manera regular la teoría de la fricción de actividad/estado en nuestros análisis de los terremotos, vamos descubriendo ejemplos más complejos de interacción entre terremotos que los que podría haber esclarecido el análisis de tensiones de Coulomb por sí solo. Hasta hace poco explicábamos sólo situaciones bastante sencillas, como las de California y Turquía, en las que un gran terremoto espolea la sismicidad en algunas zonas y la atenúa en otras. Sabíamos que corroboraría de manera más convincente la hipótesis del desencadenamiento de tensiones un caso donde se viera que varias sacudidas sucesivas, de tamaño similar, aumentaron y disminuyeron la frecuencia de terremotos en un mismo punto, de manera semejante a un atenuador de la luz eléctrica.

Toda y yo descubrimos un ejemplo espectacular de este fenómeno, al que denominamos sismicidad cruzada. A principios del año pasado emprendimos el análisis de un par de terremotos de magnitud 6,5 que tuvo lugar en Kagoshima en 1997. Inmediatamente tras el primer terremoto, que tuvo lugar en marzo, un brusco brote de sismicidad afectó inesperadamente a una región de 25 kilómetros cuadrados que se hallaba justo más allá del límite occidental del segmento donde se había movido la falla. Cuando calculamos la zona adonde el terremoto inicial transfería la tensión, hallamos que caía en la misma zona de la sismicidad reforzada. También hallamos que la cadencia empezó a decrecer, tal y como la fricción de actividad o ritmo/estado predecía. Pero cuando se produjo la segunda sacudida tres kilómetros al sur, sólo siete semanas más tarde, la región de sismicidad reforzada experimentó una brusca caída adicional de más del 85 por ciento. En este caso, la zona de desencadenamiento del primer terremoto aparecía dentro de la zona de sombra del segundo. En otras palabras, el primer temblor aumentó la sismicidad y el segundo la redujo.

Una nueva generación de predicciones

La inspección de las conversaciones entre terremotos ha revelado la intensa interactividad de la sismicidad. Y aunque otros fenómenos, además de la transferencia de tensiones, pueden influir en esas interacciones, mis compañeros y yo creemos que existen ya suficientes pruebas para justificar una revisión de las predicciones probabilísticas tradicionales de terremotos. Al refinar la probabilidad de los temblores peligrosos para que reflejen sutiles saltos y disminuciones de las tensiones, las nuevas estimaciones ayudarán a evaluar mejor el riesgo sísmico. Las estrategias tradicionales posibilitan ya en cierta medida la elección de prioridades e impulsan el reforzamiento de edificios y otras precauciones en unas ciudades o regiones a expensas de otras. Pero nuestros análisis han mostrado que tomar en consideración el desencadenamiento de tensiones pondrá en el primer lugar de la lista de alerta máxima fallas diferentes de las que los métodos tradicionales escogerían. De igual manera, una falla que la práctica tradicional supone peligrosa puede presentar en realidad un riesgo mucho menor.

Una salvedad importante: cuesta demostrar el acierto de una predicción relativa a los terremotos y casi es imposible demostrar su falsedad. Sean cuales fueren los factores que se consideren, el azar desempeña un papel capital en que se produzca o no un gran terremoto, tal y como interviene en que una situación meteorológica particular dé lugar o no a un temporal de lluvias. Los meteorólogos poseen una ventaja sobre los sismólogos: han tomado millones más de medidas clave que les ayudan a mejorar sus predicciones. Las variables meteorológicas son mucho más fáciles de medir que las tensiones del interior de la Tierra; los temporales, mucho más frecuentes que los terremotos.

Para depurar las predicciones de los terremotos se debe seguir el mismo camino, aunque con mayor parsimonia. Esta es la razón por la que mi grupo se ha adelantado a elaborar un inventario de predicciones de grandes terremotos en la proximidad de ciudades propicias a ellos, como Estambul, Landers, San Francisco y Kobe. Estamos también abordando la valoración de Los Angeles y Tokio, donde un terremoto importante podría causar pérdidas de billones de euros. Dos fuertes sacudidas a lo largo de la falla de Denali, en Alaska, en el otoño de 2002 —de magnitudes 6,7 la del 23 de octubre y 7,9 la del 3 de noviembre— parecen constituir otra secuencia desencadenada por las tensiones. Nuestros cálculos sugieren que la primera sacudida centuplicó la probabilidad de la segunda en los diez días transcurridos entre la una y la otra. Estamos, además, sometiendo a prueba la teoría mediante la predicción de terremotos menores, sin peligro; al abundar más, resultan más fáciles de predecir.

No sabemos en qué medida una predicción probabilística puede proteger a las personas y las propiedades. Pero hay muchas razones para no cejar: cientos de millones de personas viven en las zonas de falla más activas del mundo. Con tanto en juego, el desencadenamiento de tensiones —o cualquier otro fenómeno capaz de elevar la probabilidad de un terremoto devastador— no debe ser ignorado.

Bibliografía complementaria

EARTHQUAKES CANNOT BE PREDICTED. Robert J. Seller, David D. Jackson, Yan Y. Kagan y Francesco Mulargia en *Science*, vol. 275, pág. 1616; 14 de marzo, 1997.

HEIGHTENED ODDS OF LARGE EARTHQUAKES NEAR ISTANBUL: AN INTERACTION-BASED PROBABILITY CALCULATION. Tom Parsons, Shinji Toda, Ross S. Stein, Aykut Barka y James H. Dieterich en *Science*, vol. 288, págs. 661-665; 28 de abril, 2000.

Estructura y estabilidad de las proteínas

En el avance de la proteómica importará descubrir la relación entre las secuencias de aminoácidos, la estructura tridimensional y la función de las proteínas

Ana Rosa Viguera

Las proteínas constituyen más de la mitad del peso seco de las células. Si el ADN almacena la información necesaria para construir una célula, corresponde a las proteínas proporcionar los instrumentos moleculares para su ejecución. La función biológica de una proteína viene determinada por su composición química y su estructura espacial.

Los aminoácidos constituyen los componentes elementales de las proteínas. Se unen entre sí mediante enlaces amida o peptídicos. Existen 20 aminoácidos diferentes. El tamaño de una proteína varía desde decenas a miles de aminoácidos; el promedio en *Escherichia coli* es de 317 aminoácidos y de 496 en levadura. Cada proteína tiene una conformación específica. Si quisiéramos detallar esta estructura habría que determinar la posición en el espacio de cada uno de sus átomos.

La cadena principal de la proteína se compone de la repetición del grupo peptídico, cuya estructura química le confiere una determinada tendencia. Dos ángulos diedros, phi (ϕ) y psi (ψ), por cada aminoácido definen a la cadena principal. Estos ángulos diedros toman valores que se hallan acotados entre ciertos límites. Pese a estas restricciones de orden estérico, muchos de los enlaces de una cadena polipeptídica larga permiten la rotación libre de los átomos, razón de la sorprendente flexibilidad de la cadena principal.

Ahora bien, en condiciones fisiológicas la mayoría de las proteínas naturales se pliegan y forman una estructura compacta. Ello se debe a que las cadenas principales y laterales de los aminoácidos se asocian entre sí y con el disolvente para formar enlaces no covalentes. En las proteínas naturales, el plegamiento parece estar optimizado; sólo hay una conformación particularmente estable. No ocurre así con cualquier polipéptido. De las posibles secuencias de una determinada longitud (20^{100} en un polipéptido de 100 residuos), se estima que apenas un escaso 2 por ciento podría plegarse en una conformación regular. La mayoría engendraría especies con múltiples conformaciones o al azar, o especies agregadas.

En las conformaciones estables de proteínas solubles en disolución acuosa las cadenas laterales hidrofóbicas tienden a situarse en el interior de las moléculas, en tanto que las cadenas laterales polares prefieren alojarse cerca de la superficie. Este es el llamado efecto hidrofóbico, que se considera responsable principal del colapso de la proteína en formas compactas.

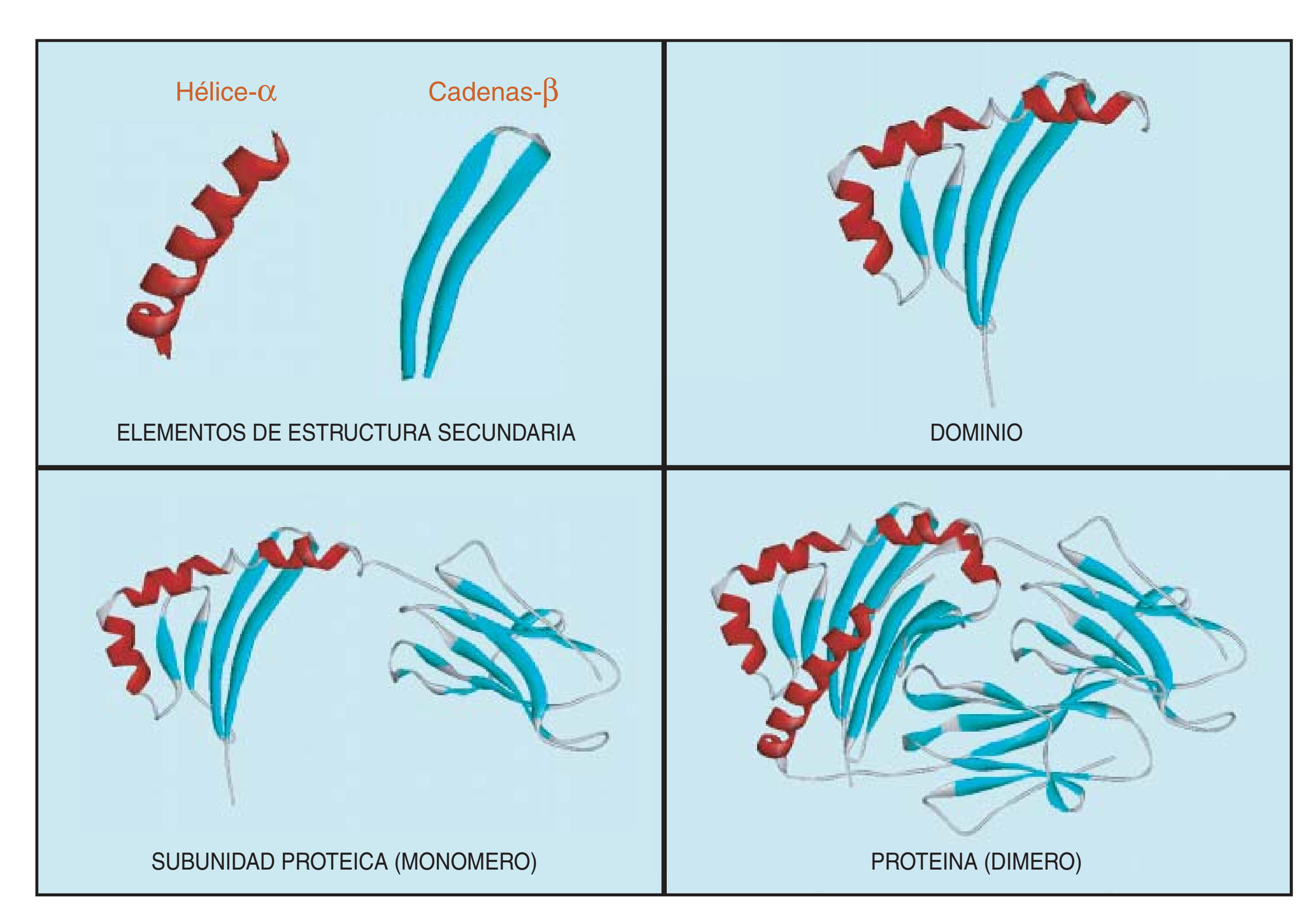
La especificidad la proporcionan principalmente, sin embargo, los puentes de hidrógeno entre grupos polares de la cadena principal. Estos y las tendencias ϕ y ψ se consideran parte esencial en la explicación de las estructuras de proteínas. La investigación sobre el plegamiento gira en torno al balance entre estos y otros tipos de fuerzas (puentes disulfuro, interacciones de van der Waals, etc.) en el establecimiento de la estructura nativa, su estabilidad y generación.

Estructura plegada y estructuras desplegadas

Entre el estado nativo y el desnaturalizado de una proteína existe una diferencia mínima en lo concerniente a la energía total. El estado desplegado tiene una entropía más favorable (lo componen múltiples conformaciones); la única conformación del estado plegado debe compensar dicha ventaja con diversas interacciones químicas. Por su parte, la estructura nativa posee una energía interna mucho menor que cada una de las conformacio-

La autora

ANA ROSA VIGUERA trabaja en la Unidad de Biofísica compartida por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas y la Universidad del País Vasco en Bilbao. Ha dedicado varios años al estudio del plegamiento del dominio SH3 de espectrina.



1. NIVELES DE ORGANIZACION ESTRUCTURAL de una proteína. Cuando se analiza la estructura tridimensional, se descubre la presencia reiterada de ciertos patrones comunes a la mayoría de las proteínas. Dos patrones en particular resultan de las interacciones de puentes de hidrógeno; dan lugar a helices-α y cadenas-β que constituyen la estructura secundaria. Los elementos de estructura secundaria se empaquetan para formar unidades globulares compactas, los dominios. Estos, a su vez, constituyen las unidades modulares de las proteínas. En ocasiones los polipéptidos individuales dan lugar a complejos proteicos o ensamblajes macromoleculares.

nes del estado desnaturalizado, pero éstas son más numerosas. La estabilidad observada de la estructura proteica es el resultado de una diferencia de 5-15 kcal/mol, entre las energías totales de los estados plegado y desplegado.

Se ha observado que existe degeneración en el código de plegamiento; a la misma estructura nativa puede llegarse desde secuencias diferentes. Durante el plegamiento se busca una estructura única nativa en el espacio conformacional para una secuencia dada, mientras que la evolución biológica busca en el espacio de secuencia una proteína con una función particular. Ambos espacios son inmensos, lo que dificulta su exploración y entendimiento.

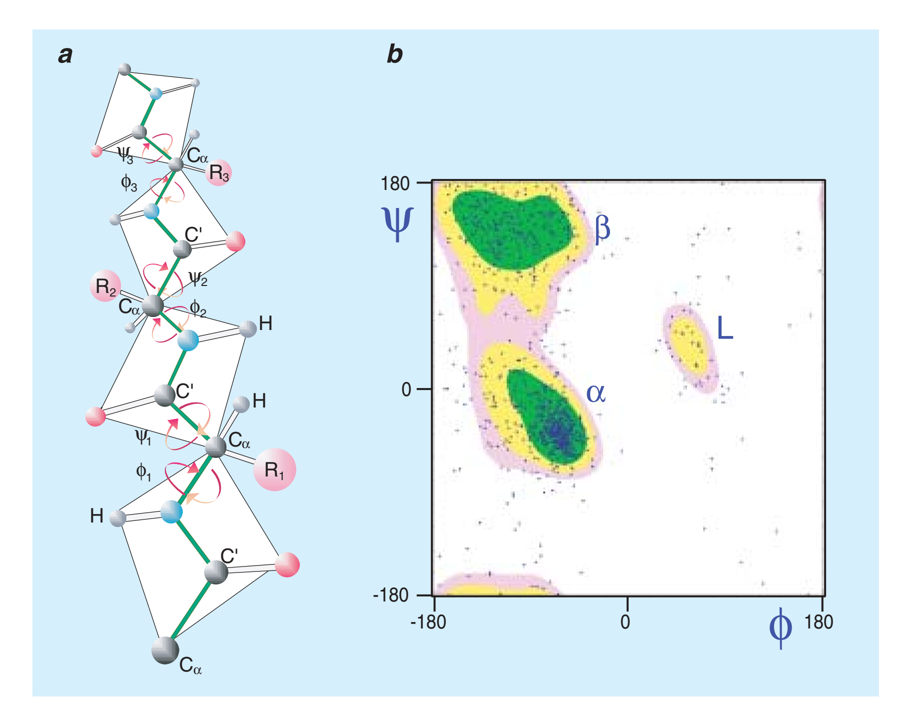
Plegamiento *in vitro*

Desde el experimento clásico de Christian Anfinsen en 1961, se sabe que una proteína está capacitada para plegarse por sí misma en disolución. Durante los últimos años, se han registrado avances teóricos y técnicos en la dilucidación de las relaciones entre la secuencia de aminoácidos y la estructura terciaria. Se busca, ahora, un modelo que permita cuantificar las predicciones acerca de la secuencia de aminoácidos, la topología de la cadena, el *p*H, la concentración de sal y la temperatura en la cinética y termodinámica del proceso de plegamiento.

El punto de partida de los experimentos de replegamiento es la proteína desnaturalizada en altas concentraciones de agente desnaturalizante (urea y cloruro de guanidinio son los más comunes). Los estados desnaturalizados son ensamblajes dinámicos de especies de energía similar que se interconvierten rápidamente.

A partir de medidas de volumen hidrodinámico y métodos espectroscópicos, se ha obtenido información de baja resolución acerca de las propiedades conformacionales de diversos estados desnaturalizados. Sabemos ya que puede persistir una estructura residual significativa en el estado desnaturalizado, estructura que depende de la forma de desnaturalización.

Los estados desnaturalizados son especies dinámicas. A pesar de encontrarse desplegados, sin estructura secundaria, retienen todavía significativas variaciones en las preferencias de los aminoácidos, que se expresan en la persistencia de interacciones locales nativas, con interacciones entre cadenas latera-



2. UNA CADENA PRINCIPAL de una proteína se define por dos ángulos diedros para cada residuo, phi (φ) y psi (ψ) (*a*). R_1, R_2 y R_3 son las cadenas laterales del tripéptido. Los ángulos suelen adoptar unos valores preferidos. Las combinaciones (φ, ψ) de una proteína natural se muestran en la llamada representación de Ramachandran (*b*). Las áreas coloreadas muestran las regiones permitidas, que se corresponden con los ángulos conformacionales encontrados en la hélice α con giro a la derecha (α), cadena β (β) y hélice girada a la izquierda (L).

les e interacciones hidrofóbicas entre residuos.

Puesto que la cantidad y el tipo de estructura residual observada en los estados desnaturalizados dependen de las condiciones de la disolución, las propiedades del estado desnaturalizado subsiguientes a la dilución de desnaturalizante difieren de las anteriores. El estado desnaturalizado en ausencia de desnaturalizantes suele considerarse la referencia más adecuada.

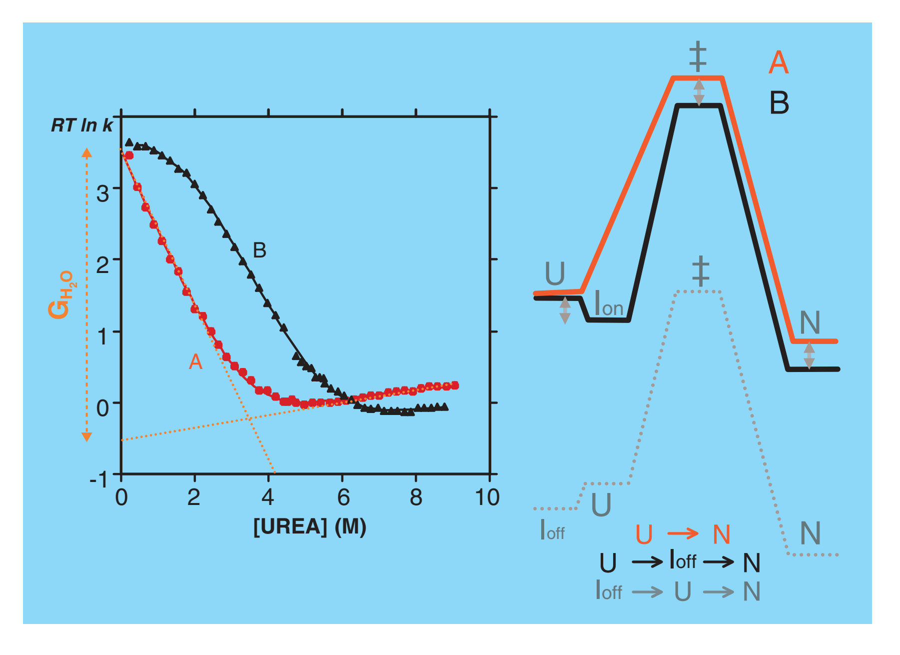
Estados intermedios

En 1968, Levinthal propuso que, si la proteína debía explorar al azar las conformaciones posibles hasta dar con el estado nativo, la búsqueda resultaría interminable. La evolución ha encontrado una solución eficaz. ¿Cuál? Creíase en un comienzo que las moléculas atravesarían estados parcialmente estructurados. Contando con unas vías específicas, bastaría el muestreo de una pequeña región del espacio conformacional.

Esta visión parecía corroborarse en experimentos que evidenciaban la existencia de intermediarios. A pesar de la rapidez y la cooperatividad del plegamiento, la mayoría de las proteínas engendraban intermediarios en una fase precoz del plegamiento. Estas especies variaban en sus propiedades conformacionales y estabilidades.

Pero el mecanismo de formación de intermediarios no acaba de entenderse en la mayoría de las proteínas, habida cuenta de la notable rapidez con que se forman estas especies (2-5 milisegundos). Para las proteínas con intermediarios, la

3. EL PLEGAMIENTO DE PROTEINAS estudiado *in vitro* consta de varias etapas. Se desnaturaliza primero la proteína en urea, cloruro de guanidinio o ácido. Se diluye el desnaturalizante. El método de flujo detenido permite la mezcla rápida de dos reactivos. El replegamiento procede a través de fases exponenciales. En los plegamientos más sencillos o dos-estados se observa una única monoexponencial cuya constante se determina por un ajuste sencillo. Estas constantes cinéticas están relacionadas con las energías de activación. Los gráficos del logaritmo natural de la constante de desplegamiento, lnk_U, y replegamiento, lnk_F, frente a la concentración de desnaturalizante (*izquierda*), son lineales para proteínas que se pliegan a través de un mecanismo de "dos-estados" (A); lnk_F se curva en el caso de que existan intermediarios de plegamiento (B); productivos (*on*) o atrapados (*off*). Diagramas de energía sencillos (*derecha*) resumen los resultados cinéticos en función de las energías relativas de los estados nativo (N), desnaturalizado (U), intermediario (I) y estado de transición (‡).



ANA ROSA VIGUERA

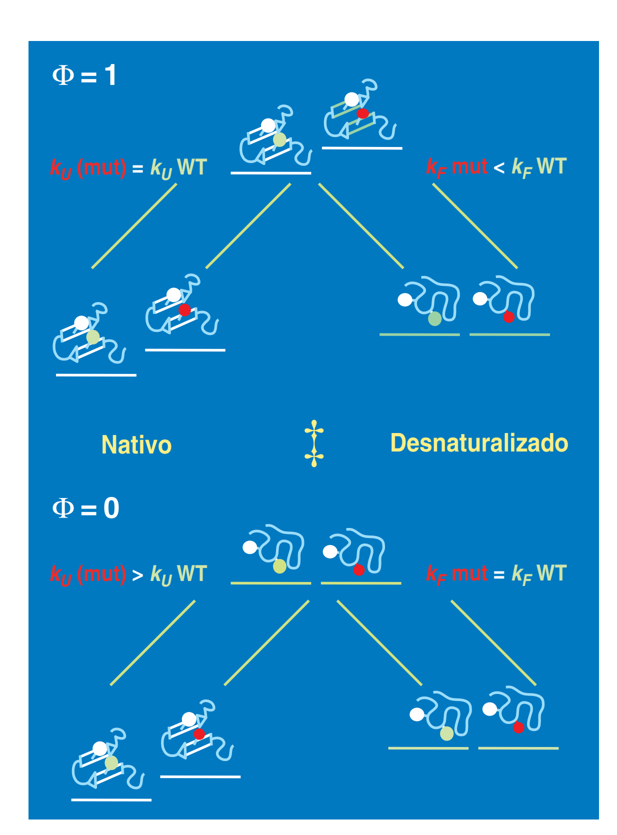
transición entre el intermediario y el estado nativo limita la velocidad de plegamiento. En algunas proteínas, los intermediarios parecen ser especies con estructura nativa. A esta clase de intermediarios pertenecen los glóbulos fundidos, en los que puede darse un carácter nativo desde el punto de vista de estructura secundaria y de morfología global; se aprecia, sin embargo, bastante desorden en las cadenas laterales.

La observación experimental de intermediarios parcialmente plegados dio lugar al modelo "andamio", según el cual el estado nativo se forma de una manera jerárquica en un camino lineal que incluye varios estados de transición consecutivos. En este modelo, se requieren intermediarios parcialmente plegados que dirijan la cadena al estado final.

En otras proteínas, se pueden acumular intermediarios plegados de forma incorrecta o atrapados. Abundan las pruebas de que los estados intermedios de proteínas plegadas con cinética de múltiples estados son trampas cinéticas. Por ejemplo, a *p*H mayor que 6 el plegamiento del citocromo *c* es lento, como resultado de la formación de una estructura plegada de forma incorrecta que incluye una interacción no nativa del grupo hemo.

A pesar de que el carácter de la estructura que se encuentra en muchos intermediarios sea esencialmente nativa, todavía pueden contener ciertos aspectos no nativos que sean eventualmente responsables de su acumulación, retardando la adquisición de la estructura final. Se ha demostrado que los intermediarios estables no son un prerrequisito para el plegamiento eficaz y rápido de cadenas polipeptídicas. Muchas proteínas pequeñas han mostrado plegarse con la cinética más simple de dos estados (ningún intermediario se acumula en el equilibrio o transitoriamente).

Las diferencias más significativas entre las proteínas que se pliegan a través de intermediarios y las que lo hacen directamente, son la longitud de la cadena y la estabilidad. En general, las proteínas que se pliegan por un mecanismo de dos estados constan de menos de 110 aminoácidos. De acuerdo con ciertos trabajos, puede provocarse un cambio desde una cinética de tres a dos estados si se desestabiliza el estado nativo. Asimismo se han encontrado cambios de mecanismos de dos a tres estados cuando se estabiliza o elonga una proteína pequeña.



4. LAS TECNICAS DE INGENIERIA DE PROTEINAS se han utilizado para diseccionar las interacciones y estructura presente en el estado de transición (‡). El efecto de la mutación en la energía del estado nativo y del estado de transición con respecto al estado desplegado puede medirse utilizando una combinación de experimentos de equilibrio y cinéticos. Los valores de ϕ_F pueden tomarse como una medida del grado de formación de estructura en ‡. Los valores de ϕ_F de 0 indican que existe poca estructura en la región que rodea al punto de la mutación en el estado de transición. Valores de ϕ_F de 1 indican que la región está altamente organizada y valores intermedios, una formación de estructura parcial.

ANA ROSA VIGUERA

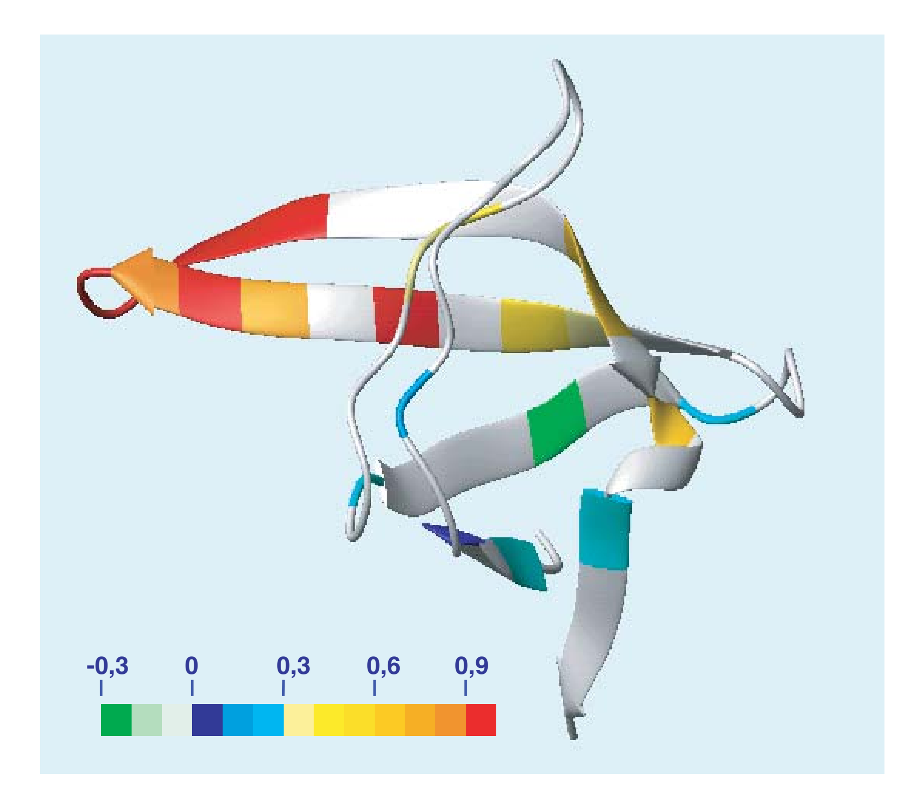
El estado de transición

A menudo se compara el plegamiento proteico con una reacción química unimolecular, en la que el reactivo (la proteína desplegada) se convierte en el producto (la proteína plegada). Para las proteínas pequeñas monodominio, se obtienen cinéticas de plegamiento monoexponenciales en la mayoría de los casos (las moléculas desnaturalizadas tienen la misma probabilidad de alcanzar el estado nativo), de forma análoga a las reacciones sencillas con estados de alta energía.

Las reacciones químicas unimoleculares están gobernadas por un paso simple limitante de la velocidad, cuando el sistema atraviesa el "estado de transición". En principio este concepto se introdujo para explicar por qué un determinado proceso no ocurre a la máxima velocidad. El estado de transición de una reacción química sencilla es una única conformación con energía interna desfavorable, que representa la barrera principal entre reactivos y productos.

Para el plegamiento podría haber alguna conformación particular que actuase como "cuello de botella". Una conformación de esta índole tendría una energía libre interna alta y sería adoptada raramente por la molécula. Sin embargo, a diferencia de las reacciones químicas el plegamiento de proteínas está gobernado por la entropía: existen muchas conformaciones que se corresponden con el mismo grado de avance de la reacción.

A diferencia de una reacción química sencilla, en la que la barrera de energía libre representa la contribución de una única conformación, la barrera para el plegamiento es una barrera de energía libre total, dominada por la entropía conformacional. Esta barrera de origen entrópico aparece como resultado de la decreciente flexibilidad de la cadena peptídica según se va plegando.



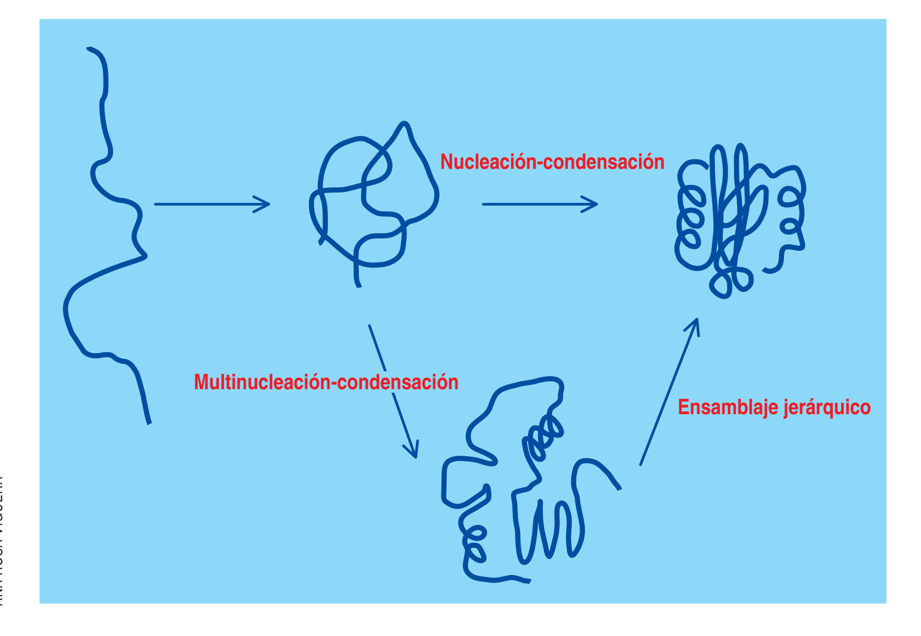
5. VALORES DE ϕ_F medidos en un mutante del dominio SH3 de espectrina. En la figura aparece la estructura de la proteína nativa; el código de color nos indica la contribución energética al estado de transición relativa al estado nativo de determinadas cadenas laterales de la proteína. Las zonas con colores rojos más intensos serían las que se encontrarían más estructuradas en el estado de transición.

Los estados de transición de plegamiento sólo pueden determinarse estudiando las cinéticas de plegamiento y desplegamiento. Normalmente el replegamiento se inicia por un cambio rápido del disolvente desnaturalizante (bajo o alto *p*H o alta concentración de urea) a condiciones nativas. El proceso de plegamiento subsiguiente se sigue por una técnica espectroscópica o por resonancia magnética nuclear (RMN). Se ha utilizado también la espectrometría de masas y, en el caso de reacciones de plegamiento muy rápidas, la transferencia de electrones.

El estudio de la dependencia con la temperatura de las velocidades de plegamiento y desplegamiento aporta información acerca de la naturaleza del estado de transición. Mediante este método, podemos calcular los valores del cambio en entalpía (ΔH), entropía (ΔS) y capacidad calorífica (ΔCp) entre el estado desnaturalizado, el estado de transición y el estado plegado. En general estos métodos limitan su eficacia a la determinación de propiedades promedio y no proporcionan información específica sobre la estructura del estado de transición. Con las técnicas de ingeniería de proteínas sí podemos hacernos una imagen detallada de la estructura y energía del estado de transición.

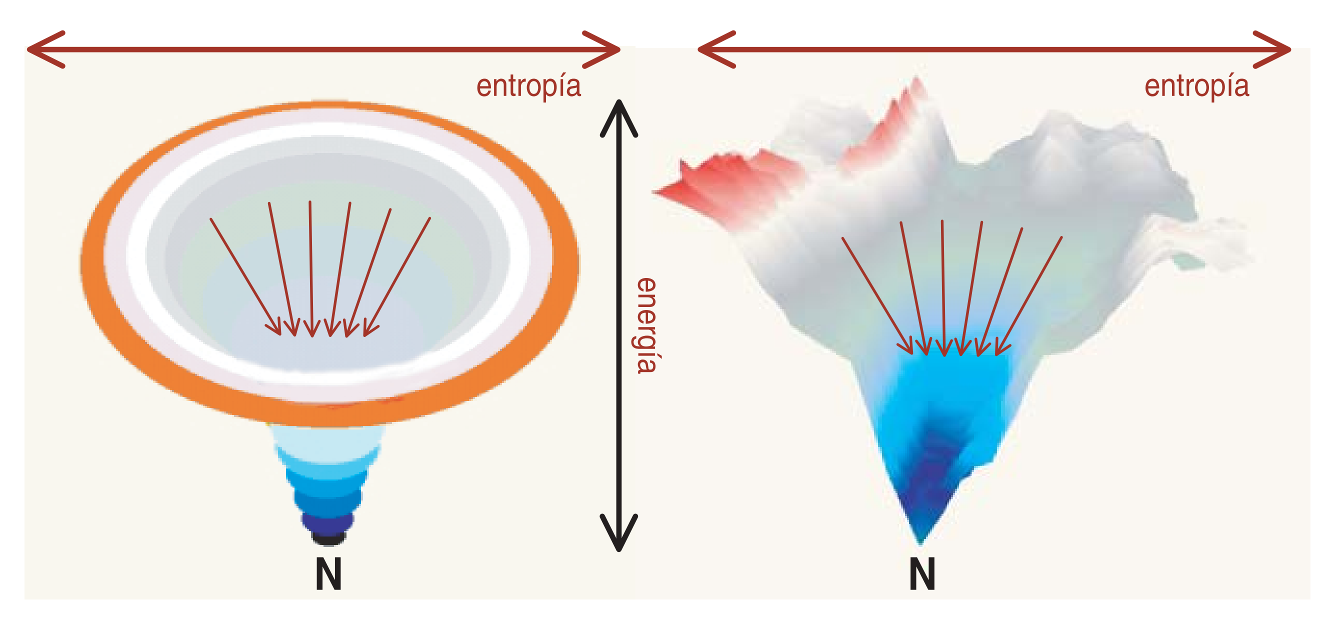
Los cambios ejercidos en las cinéticas de replegamiento y desplegamiento de una proteína tras una mutación sirven para definir un valor ϕ_F como ($\Delta\Delta G_{U-\ddagger}/\Delta\Delta G_{U-F}$). El parámetro ϕ_F es una medida de la fracción de energía libre que se pierde en el estado de transición con relación al estado nativo, cuando se realiza una mutación desestabilizante (o de la energía que se gana en una mutación que estabiliza la proteína).

Con el fin de obtener la máxima resolución, la mayoría de las mutaciones analizadas son individuales (sustitución de un aminoácido por



ANA ROSA VIGUERA

6. RIBONUCLEASA BARNASA, la primera proteína analizada por el método de ingeniería de proteínas, mostraba valores de ϕ_F próximos a 0 o 1. La barnasa se pliega a través de un intermediario obligado (*abajo*). En el proceso sigue un modelo jerárquico, en el que buena parte de la estructura secundaria se forma en subdominios en el estado intermediario; el paso limitante lo representa la coalescencia de estos subdominios. Por el contrario, en general, los valores de ϕ_F medidos en el caso del inhibidor de la quimotripsina, CI2, son pequeños e intermedios, en el rango de 0,2-0,8. El CI2 se pliega directamente por nucleación-condensación sin intermediarios (*arriba*).



7. EL PROCESO DE PLEGAMIENTO SE ASOCIA a un movimiento de moléculas en un paisaje de energía con forma de embudo. En un paisaje "suave" (*izquierda*), el plegamiento transcurre rápidamente y predominan los contactos nativos; en un paisaje "rugoso" (*derecha*), los intermediarios se forman de manera transitoria y a menudo representan estructuras plegadas incorrectamente atrapadas en mínimos locales de energía.

otro). Los valores de ϕ_F indican el grado de formación de estructura en el estado de transición; oscilan entre 0, que nos dice que existe poca estructura en la región que rodea al punto de la mutación en el estado de transición, y 1, cuando la región está altamente organizada; los valores intermedios revelan la formación de estructura parcial.

Se han analizado las propiedades conformacionales del estado de transición de varias proteínas. Los resultados obtenidos para más de 150 de mutantes del inhibidor de la quimotripsina CI2, de 62 residuos, ha permitido proponer el mecanismo de nucleación-condensación, que describe un conjunto de conformaciones en el estado de transición compacto y que contiene un núcleo deslocalizado y extendido estabilizado por numerosas interacciones parcialmente formadas. Se producen el desplome y la consolidación de la estructura después sobre el esqueleto proporcionado por el núcleo.

Este comportamiento de distribuciones deslocalizadas de valores de ϕ_F intermedios se ha ratificado en otras proteínas que se pliegan por un mecanismo de dos estados. Otras proteínas mayores, como la barnasa, de 110 aminoácidos, pueden tener interacciones totalmente formadas en el estado de transición, de acuerdo con modelos que contemplan un plegamiento secuencial por dominios.

De lo anterior se desprende que las proteínas difieren entre sí en el mecanismo exploratorio del paisaje de energía de plegamiento. Además, los cálculos teóricos y los datos experimentales indican que la forma del paisaje de plegamiento puede cambiar según las condiciones empleadas, la secuencia precisa de aminoácidos y la topología de la cadena.

Aproximaciones teóricas

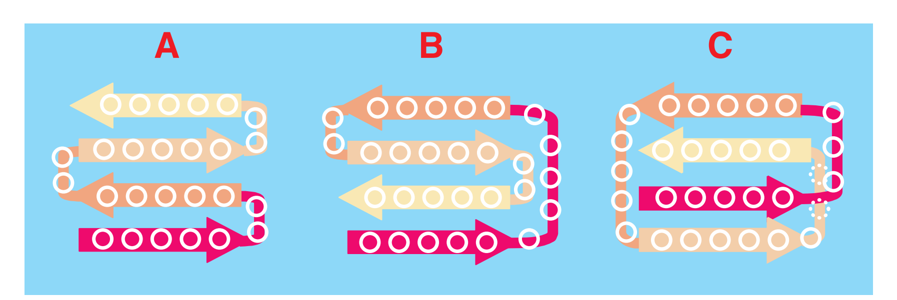
Simular el plegamiento en el ordenador es tarea ardua y complicada. Exige tomar en cuenta varios supuestos: considerar un número inmenso de conformaciones, 2^N para una proteína de N aminoácidos (como mínimo dos variables por residuo, si atendemos a los ángulos diedros, que pueden tomar infinidad de valores); evaluar su energía, para lo que no existen datos contrastados experimentalmente; encontrar una coordenada de reacción válida (por ejemplo el radio hidrodinámico de giro); y ver cómo, tras conocer el estado nativo y proponer un potencial válido al que se sometan las moléculas desplegadas, intentar reproducir datos de plegamiento y valores de ϕ_F experimentales. Aunque existen simulaciones de dinámica molecular con representaciones de todos los átomos de una proteína, éstas pueden computarse por tiempos irrelevantes comparados con los necesarios para evaluar el plegamiento.

Una alternativa a las descripciones atómicas es introducir representaciones simplificadas de la estructura de una proteína. En estos estudios, los aminoácidos se representan como una o varias unidades de interacción que pueden también tener algunos grados de libertad. Importa, sobre todo, determinar la función de energía apropiada.

A largo plazo debe comprobarse sistemáticamente cuál de los términos de la función resulta determinante para estabilizar los mapas nativos y sean, así, los de mínima energía.

Los modelos mecánico-estadísticos de plegamiento representan la cadena en sus múltiples conformaciones y sus interacciones microscópicas. En este nuevo planteamiento se han sustituido los diagramas de reacción sencillos, donde se representaban las energías libres de un número pequeño de macroestados, por los paisajes de energía, donde se representan las energías libres en función de los grados de libertad. Un microestado es una conformación particular de la cadena. El estado desnaturalizado, el esta-

ANA ROSA VIGUERA



8. PAPEL DE LA TOPOLOGIA NATIVA y coste entrópico en una fase precoz del plegamiento. La formación de contactos entre aminoácidos distantes limita el número de conformaciones accesibles al segmento intermedio correspondiente; no así la de aminoácidos cercanos entre sí. Por eso las interacciones locales son más fáciles de formar al principio del plegamiento que las interacciones no locales. De las tres representaciones ilustradas, *A* sería la más rápida en plegarse ya que tiene un orden de contacto menor; en promedio, las interacciones se establecen entre residuos más cercanos que en la molécula *B* o *C*.

do de transición o los intermediarios de plegamiento son macroestados (colecciones de multitud de conformaciones individuales).

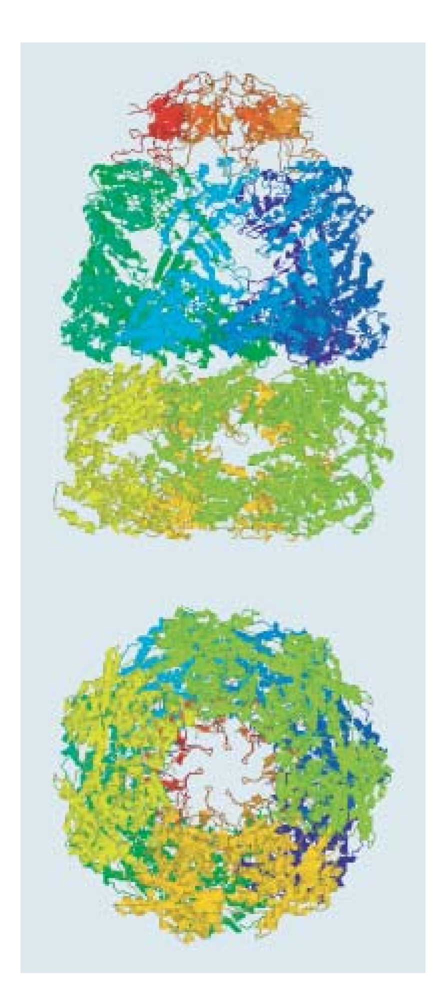
De acuerdo con los principios de la termodinámica, si un sistema tiene *n* grados de libertad $\boldsymbol{\gamma} = [\gamma_1, \gamma_2, ..., \gamma_n]$, el estado estable del sistema puede encontrarse determinando el conjunto de valores $\boldsymbol{\gamma}^* = [\gamma^*_1, \gamma^*_2, ..., \gamma^*_n]$ que dan los mínimos valores de la función de energía $F(\boldsymbol{\gamma}) = F(\gamma_1, \gamma_2, ..., \gamma_n)$, cuando se exploran todos los posibles valores de $\boldsymbol{\gamma}$. Estas funciones $F(\boldsymbol{\gamma})$ se denominan paisajes de energía. La distinción entre los paisajes de energía y un diagrama de coordenada de reacción es una distinción entre la aproximación macroscópica y la microscópica.

Un microestado es un punto en el paisaje de energía $F_{micro} = F(\boldsymbol{\gamma})$, o energía libre interna. Un macroestado posee una energía $F_{macro} = F(\xi)$, donde ξ es una magnitud escalar, tal como una coordenada de reacción o una variable de progreso. Un valor dado de ξ representa un conjunto particular de conformaciones microscópicas. Hay muchas conformaciones de alta energía y muy pocas de baja energía, de ahí la forma de embudo de los paisajes de energía. La proteína desnaturalizada (en la zona superior del embudo) se parece a una cadena al azar, en la que las interacciones locales dominan el comportamiento conformacional.

Puesto que las proteínas tienen muchos grados de libertad, hay en principio numerosas coordenadas diferentes posibles para describir el progreso del plegamiento. Si se toma como variable de progreso de la reacción el número de contactos hidrofóbicos, la densidad de estado será una medida del número de microestados que componen un macroestado. El experimento de plegamiento simulado en el ordenador comienza con múltiples conformaciones con 0 contactos. Cuanto mayor es el número de contactos, menos son las conformaciones. Cuando se ha formado la estructura nativa, sólo una conformación contiene todos los contactos.

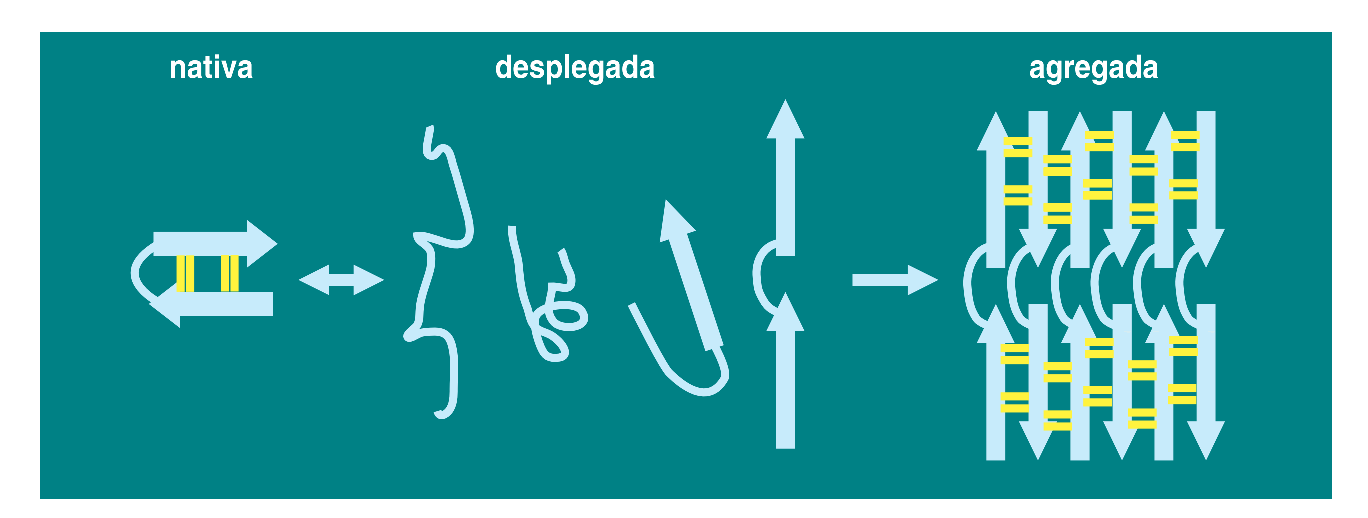
Para una determinada conformación, $F_{micro}(\xi)$ es una energía libre, pero no una energía libre total, sino la energía libre de una cadena, mientras que $F_{macro}(\xi)$ es la energía libre de un conjunto de conformaciones con ciertas características macroscópicas, como el estado desnaturalizado, intermediario, estado de transición. $F_{macro}(\xi)$, que incluye una entropía conformacional, es función de la variable ξ; por lo tanto, se presta a una representación bidimensional de la energía libre de plegamiento frente a la coordenada de reacción ξ, que es el diagrama tradicional. Sin embargo, $F_{micro}(\xi)$ es el paisaje de energía y depende de muchos grados de libertad.

Este tipo de aproximaciones teóricas al problema de plegamiento han permitido observar, por ejemplo, que el balance entre la energía interna y la entropía no es perfecto durante el plegamiento (la entropía se pierde antes) y los primeros pasos del plegamiento conllevarían una subida en energía libre total hasta un máximo que se identifica con el estado de transición. Esta barrera de potencial sería la responsable última de la velocidad de plegamiento. Se confirma también que la topología es un determinante importante de la vía de plegamiento. Asimismo, modelos teóricos sencillos han conseguido reproducir con relativa precisión parámetros experimentales.



ANA ROSA VIGUERA

9. EN LA CELULA el plegamiento se produce en un entorno de altas concentraciones de moléculas y iones muy diversos. Entre los factores asociados con el plegamiento en el interior celular destacan las chaperonas y catalizadores moleculares. En la figura se muestra la estructura cristalina del complejo chaperonina asimétrico GroEL-GroES-ADP$_7$, vista desde dos orientaciones.



10. LA AGREGACION representa un proceso competitivo al plegamiento eficaz. En algunas proteínas concurren formas intermedias o desplegadas con alta tendencia a interaccionar entre sí para formar ensamblajes moleculares de tipo amiloide, con un patrón estructural bastante regular y consistente principalmente en cadenas-β que finalmente se disponen en forma de fibras de grandes dimensiones.

ANA ROSA VIGUERA

Plegamiento en vivo y enfermedad

A pesar de que la mayoría de las cadenas proteicas muestran una elevada proporción de éxito en plegamiento correcto dentro de las células, algunas proteínas se muestran proclives a la agregación; al eludir los mecanismos de plegamiento, provocan enfermedades.

Los estados intermedios de algunas cadenas exponen zonas hidrofóbicas, que favorecen la agregación entre cadenas idénticas o parecidas. En la célula, las chaperoninas contribuyen a prevenir la agregación de las proteínas recién sintetizadas. Se sabe que una parte notable de la cadena que se está sintetizando se asocia con miembros de la familia de Hsp70. Las chaperoninas cilíndricas actúan posteriormente y proporcionan un ambiente aislado para el plegamiento de una pequeña fracción (aproximadamente 10 % de todas las proteínas citosólicas).

En el medio intracelular existe una elevada concentración macromolecular, que incide en el plegamiento de proteínas. El total de concentración de proteínas y ácidos nucleicos en el interior de la célula es tan alto (340 g/l en el caso de *E. coli*), que cerca del 30 % del volumen no está disponible para otras macromoléculas. La teoría predice dos consecuencias principales de tal grado de concentración: la difusión se verá reducida entre 3 y 10 veces y las constantes de asociación de las macromoléculas que interaccionan entre sí se incrementarán en uno o dos órdenes de magnitud. De ello se deriva que la tendencia a la agregación se reforzará con dicha concentración; dentro de este grupo se incluye las que dan lugar a enfermedades relacionadas con amiloides.

Patologías sin aparente relación —la enfermedad de Alzheimer, la fibrosis cística, la enfermedad de las vacas locas, una forma heredada de enfisema y numerosos tumores— resultan del plegamiento incorrecto de proteínas. El autoensamblaje anormal comporta deposición de material proteináceo en agregados insolubles ordenados y fibras de amiloide. Se han identificado cerca de veinte precursores amiloidogénicos. Se sospecha que en intermediarios desplegados o parcialmente plegados podría encerrarse la causa común de los desórdenes asociados a amiloides.

Estructura tridimensional

La identificación de la estructura primaria de una proteína a través de la secuenciación de ADN es inmediata (código genético). Pero la adquisición de datos tridimensionales resulta todavía lenta y se circunscribe a proteínas que cristalizan en una forma adecuada o pueden resolverse por RMN en disolución. Se requieren, pues, algoritmos que traduzcan la información lineal en espacial.

La predicción de la estructura tridimensional de una proteína desde su estructura primaria abarca un doble aspecto: describir el estado nativo y conocer la trayectoria de plegamiento. Ambas tareas trascienden las posibilidades de los métodos actuales de computación. Sí podemos abordar la estructura proteica a partir de las energías de interacción para perturbaciones pequeñas de estructuras tridimensionales conocidas. Cuando conocemos con suficiente precisión una determinada estructura por cristalografía o por RMN, podemos entonces refinar las coordenadas atómicas mediante cálculos con funciones de energía; pero estos métodos no son aplicables si se carece de una estructura aproximada.

Bibliografía complementaria

PROTEIN MISFOLDING, EVOLUTION AND DISEASE. C. M. Dobson, en *Trends Biochem. Sci.* vol. 24, págs. 329-332; 1999.

A SURPRISING SIMPLICITY TO PROTEIN FOLDING. D. Baker, en *Nature*, vol. 405, págs. 39-42; 2000.

CRITICAL ASSESSMENT OF METHODS OF PROTEIN STRUCTURE PREDICTION: (CASP): Round IV. J. Moult, K. Fidelis, A. Zemla y T. Hubbard, en *Proteins* (Suppl.); vol. 45 (S5), 2001.

Ciencia del champán

Estudio científico de la efervescencia del champán, innegable parte de su atractivo

Gérard Liger-Belair

Haga saltar el corcho de una botella de champán y sírvase una copa. La efervescencia lanzará al aire miles de gotitas doradas que llevarán hasta la lengua y la nariz el *bouquet* del vino. Una sinfonía de diminutos estallidos acompaña el sorbo, en el que se yuxtaponen el frescor carbonatado y la calidez alcohólica.

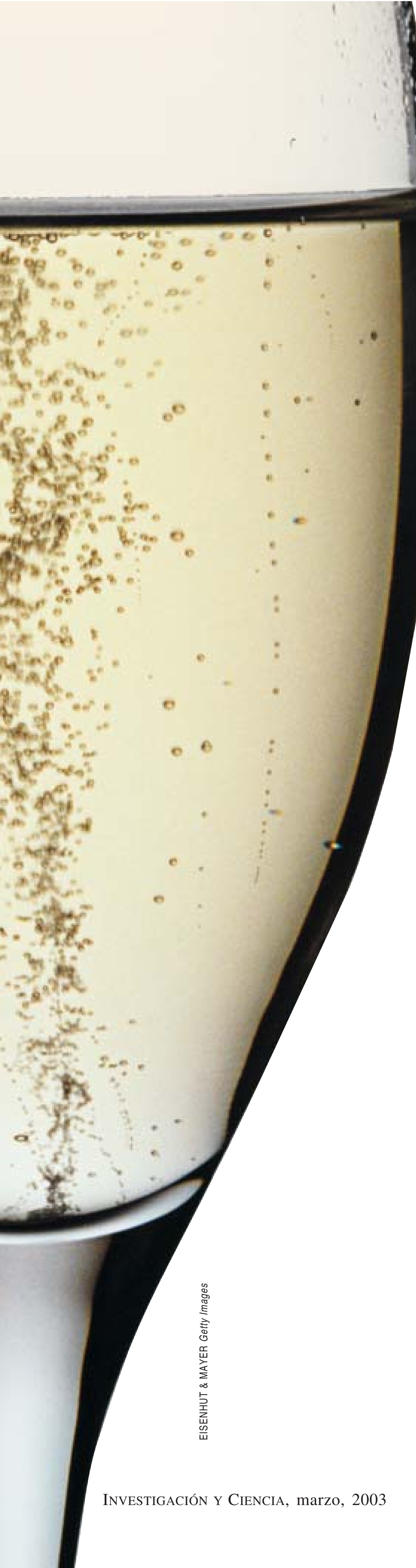
Entre los signos distintivos de un buen champán destacan las procesiones de múltiples burbujas que suben desde las paredes de la copa como minúsculos globos. En una copa aflautada, forman cuando llegan a la superficie un anillo o collarín. No hay prueba científica que correlacione la calidad de un champán con la finura de sus burbujas, pero con frecuencia se liga lo uno a lo otro. Los vinateros *champenoises* tienen el mayor interés en dominar la efervescencia del champán, porque es su característica distintiva y posee un gran valor comercial. Hace unos años, unos colegas míos, investigadores de la Universidad de Reims Champagne-Ardenne y de Moët & Chandon, y yo nos propusimos ahondar en el papel que representa cada uno de los numerosos parámetros que intervienen en la formación de las burbujas de las bebidas carbonatadas.

Génesis de una burbuja

La producción de las burbujas gaseosas del champán, los vinos espumosos y las cervezas se debe sobre todo al dióxido de carbono. Aparece cuando la levadura fermenta los azúcares y los convierte en moléculas de alcohol y dióxido de carbono. En las bebidas gasificadas la efervescencia se consigue



EL ASCENSO DE LAS BURBUJAS del champán o del cava, corto pero espectacular, hasta el borde del líquido materializa un complejo sistema fisicoquímico, a la vez más funcional y más pintoresco de lo que podría esperarse.


EISENHUT & MAYER *Getty Images*

por medio de la carbonatación industrial. Tras el embotellado o enlatado, se establece el equilibrio entre el dióxido de carbono disuelto en el líquido y el gas que hay en el espacio libre bajo el tapón, la chapa o la tapa, conforme a la ley de Henry: la cantidad de gas disuelto en un fluido será proporcional a la presión del gas con el que esté en equilibrio.

Al abrirse el recipiente, la presión del dióxido de carbono que hay encima del líquido se reduce bruscamente; se rompe el equilibrio termodinámico. Como resultado, el líquido queda sobresaturado de moléculas de dióxido de carbono. Para recuperar la estabilidad termodinámica correspondiente a la presión atmosférica, deberán salir del fluido sobresaturado moléculas de dióxido de carbono. Cuando la bebida se escancia, dos mecanismos permiten escapar al dióxido de carbono disuelto: la difusión a través de la superficie libre del líquido y la formación de burbujas. Hemos calculado que sólo se debe a las burbujas un 15 por ciento de la desgasificación.

Para agruparse en burbujas incipientes, empero, las moléculas de dióxido de carbono deben vencer la cohesión de las moléculas de líquido, debida a las fuerzas de van der Waals (o de atracción dipolar). La formación de burbujas tropieza, pues, con una barrera energética, tanto si se produce en el seno del líquido (recibe entonces el nombre de nucleación homogénea) como si ocurre en las paredes de la copa. En el caso de la nucleación homogénea, cabe imaginar que las fluctuaciones locales de densidad crean regiones de densidad muy reducida donde aparece una microburbuja. Cuando su radio es mayor que un radio crítico, que no depende más que de las propiedades fisicoquímicas del champán, crecerá espontáneamente: el dióxido de carbono disuelto en el líquido cerca de la burbuja pasa al estado gaseoso y se incorpora a la burbuja. La razón estriba en que la curvatura de la interfase de la burbuja causa dentro de la bolsa de gas un exceso de presión inversamente proporcional a su radio (como dicta la ley de Laplace). Cuanto menor es una burbuja, mayor es la sobrepresión en su interior. Por debajo del radio crítico, el exceso de presión dentro de una bolsa de gas impide que el dióxido de carbono disuelto se difunda en ella; la microburbuja acaba por ser reabsorbida y desaparece. En una botella de champán recién abierta, el radio crítico ronda las 0,2 micras. Para vencer la barrera energética se necesitarían concentraciones de dióxido de carbono disuelto muy superiores a las medidas en el champán. Por tanto, no nacen espontáneamente burbujas en el seno del champán.

Así que la efervescencia del champán ha de proceder de las paredes de la copa. Para observar con detalle los lugares donde se forman burbujas (o "viveros de burbujas"), apuntamos una videocámara de alta velocidad equipada con un objetivo de microscopio a las bases de centenares de columnas de burbujas. En contra de la creencia general, los puntos de nucleación no se encuentran en irregularidades de la superficie del vidrio; sus dimensiones son muy inferiores al radio de curvatura crítico necesario para la formación de las burbujas. Los viveros de burbujas surgen en impurezas *adheridas* a la pared de vidrio. Se trata de depósitos calcáreos, de posos, o, sobre todo, de fibras de celulosa, cortas y más o menos cilíndricas, que caen del aire o proceden del trapo con que se secó la copa. Las bolsas de gas que se crean al verter el líquido quedan atrapadas en las fibras, a las que, por su geometría, la bebida no puede humedecer del todo (*véase el recuadro* "Burbujas de champán"). (En ocasiones, la impureza se desprende y lleva consigo el vivero de burbujas al seno del champán; a medida que se dilaten las burbujas irá subiendo hasta la superficie.)

Durante la formación de la burbuja, migran al interior de las minúsculas bolsas de gas moléculas de dióxido de carbono disuelto. Las bolsas crecen y, por fin, se desarrolla una burbuja macroscópica. Al principio, permanece anclada a su punto de nucleación a causa de las fuerzas capilares. Finalmente, con el creciente empuje hidrostático que sufre, se desprende y deja paso a la constitución de otra burbuja. El proceso se repite hasta que la formación de burbujas cesa al no quedar más dióxido de carbono disuelto.

El ciclo de la producción de burbujas en un punto de nucleación se caracteriza por el número de burbujas que se producen por segundo, cifra que determina un estroboscopio: cuando la frecuencia con que destella es igual a la de la formación de burbujas, el tren de burbujas parece inmóvil.

Como la cinética de la formación de burbujas depende también del contenido en dióxido de carbono disuelto, su frecuencia varía de una bebida carbonatada a otra. En el champán, por ejemplo, donde el contenido en gas viene a ser el triple que en la cerveza, los puntos de nucleación más activos desprenden hasta unas 30 burbujas por segundo, mientras que en las cervezas los viveros producen sólo unas 10 por segundo.

El ascenso

Una vez se ha desprendido de su punto de nucleación, la burbuja crece mientras se abre paso hacia la superficie. El aumento de tamaño durante el ascenso se debe a la difusión continua del dióxido de carbono disuelto a través de la interfase gas-líquido. El empuje (hidrostático) aumenta con la expansión, con lo que las burbujas se aceleran sin cesar y se separan entre sí durante la subida.

Las cervezas y los vinos espumosos no son líquidos puros. Además de alcohol y dióxido de carbono disuelto, contienen muchos otros compuestos orgánicos que actúan como las moléculas de jabón, es decir, son moléculas —en su mayor parte proteínas y glicoproteínas— tensioactivas o surfactantes. Tienen una parte soluble y una parte insoluble en agua. Más que permanecer disueltos en la masa líquida, se reúnen en torno a la superficie de una burbuja con sus extremos hidrófobos apuntados hacia el gas y los hidrófilos clavados en el líquido.

El recubrimiento con surfactantes de una burbuja afecta a su comportamiento cuando el aumento del empuje provoca el desprendimiento y la obliga a abrirse camino a través de las moléculas de líquido interpuestas. Las moléculas surfactantes adsorbidas vuelven más rí-

El autor

GERARD LIGER-BELAIR es profesor asociado de la Universidad de Reims Champagne-Ardenne, donde estudia la química física de las burbujas de las bebidas carbonatadas. Es también consultor del departamento de investigación de Moët & Chandon.



EISENHUT & MAYER *Getty Images*; CORTESIA DE GÉRARD LIGER-BELAIR (*insertos*)

BURBUJAS DE CHAMPAN





CICLO DE VIDA DE UNA BURBUJA: La muy corta existencia de una burbuja de champán empieza en una minúscula mota de celulosa que quedó pegada a la pared de la copa cuando se la secó tras lavarla (*abajo*). Cuando se sirve el vino espumoso, sobre esa fibra de celulosa se forma una bolsa de gas de dimensiones submicrométricas. A causa de la presión, en esa pequeña cavidad penetra dióxido de carbono y acaba dilatándola tanto, que el empuje hidrostático la separa del punto de nucleación. Durante su viaje a la superficie, la burbuja sigue agrandándose conforme más dióxido de carbono se abre paso en su interior (*centro*). A la vez, se adhieren a la membrana gas-agua moléculas aromáticas presentes en la bebida, fenómeno que aumenta la resistencia al avance y, por tanto, retarda el ascenso de la burbuja. Poco después de emerger al aire, la cápsula de gas cargada de moléculas de sabor se desploma sobre sí misma y dispara al aire un poco de vino, realzando así el sabor y olor del champán (*arriba*).

PARA VER BIEN LAS BURBUJAS: Lo mejor, según los expertos, es servir el champán en una copa aflautada de pie largo, con una capacidad de un octavo de litro más o menos (*izquierda*). Esa configuración larga y estrecha alarga y resalta el flujo de las burbujas hacia la superficie, donde la limitada área abierta a la atmósfera concentra los aromas transportados por las burbujas y que se liberan cuando éstas colapsan. Además, la esbeltez del recipiente prolonga el frescor de la bebida y ayuda a retener su efervescencia.

La copa aflautada es más adecuada que la "copa de champán" clásica, aquella copa de pie corto y cuenco ancho y bajo antaño tan de moda. Dice la leyenda que esas copas se diseñaron tomando como modelo los pechos de María Antonieta, reina de Francia a fines del siglo XVIII. Aunque aún se usa mucho, la copa clásica nunca se diseñó para el champán y por ello, según los entendidos, no permite al catador disfrutar por completo las cualidades del vino. Las copas bajas y de boca ancha no logran guardar el frescor tanto como las aflautadas. Además, no ofrecen la misma visión de las elegantes columnas de burbujas.

Para abrir una botella de champán, ésta se sujeta con el corcho apuntando 45 grados hacia arriba. Se sujeta el corcho y suavemente se rota la botella en un solo sentido. Mas que saltar con un taponazo, el corcho saldrá con un sonido amortiguado. Con los taponazos fuertes se pierden burbujas y ya reza el dicho que "lo que gana el oído, lo pierde el gusto."

gida la burbuja porque forman en la superficie una especie de cáscara. Según la teoría de la dinámica de fluidos, una esfera rígida que se eleva en el seno de un fluido sufre mayor resistencia que una esfera más flexible, libre de surfactantes. Además, las moléculas surfactantes con las que se topa durante el ascenso se recogen en la superficie de la burbuja y aumentan su área rígida. Por tanto, la resistencia aerodinámica que una burbuja de radio constante experimenta mientras asciende por el líquido aumenta progresivamente; la burbuja se frena hasta una velocidad mínima cuando la interfase gas-líquido está ya contaminada por completo. Para ser estrictos, los límites de la burbuja se vuelven completamente rígidos antes de que estén del todo cubiertos de surfactantes, tal y como demostró no hace mucho un equipo de la Universidad Louis Pasteur de Estrasburgo.

El comportamiento de una burbuja ascendente en crecimiento es más complicado que el de otra de radio constante. La dilatación de la burbuja durante el ascenso a través del líquido sobresaturado (de 300 a 400 micrómetros por segundo) hace que su superficie crezca y ofrezca más espacio para adsorber surfactantes. Por consiguiente, las burbujas sufren al hincharse dos efectos opuestos. Si la velocidad de dilatación rebasa la velocidad a la que los surfactantes proporcionan rigidez a la superficie, la burbuja "limpia" constantemente su superficie porque disminuye el cociente entre el área cubierta de surfactantes y el área libre de ellos. Si ese cociente aumenta, la superficie de la burbuja acaba inexorablemente contaminada por una monocapa surfactante y adquiere rigidez.

Midiendo los coeficientes de resistencia al avance de las burbujas en expansión, tanto de champán como de cerveza, mientras ascienden hasta la superficie y comparándolos luego con los datos facilitados por la literatura científica acerca de la dinámica de burbujas, concluimos que las burbujas de la cerveza actúan, casi a todos los efectos, como esferas rígidas. En cambio, las burbujas del champán, vinos espumosos y refrescos gaseados presentan una interfase mucho más flexible durante el ascenso. No sorprende demasiado, pues la cerveza contiene macromoléculas surfactantes en mucha mayor cantidad (del orden de algunos centenares de miligramos por litro) que el champán (sólo unos pocos mg/l). Además, como el contenido en gas de la cerveza es menor, las burbujas de cerveza crecen más despacio que las burbujas de champán. Como consecuencia, puede que la dilatación de una burbuja de cerveza no limpie tanto su interfase gas-líquido como para impedir que se vuelva rígida. En el champán, los vinos espumosos y las bebidas gaseosas, las burbujas crecen demasiado rápido y no hay suficientes moléculas surfactantes que les aporten rigidez.

Cuando las burbujas revientan

A los segundos de su nacimiento y liberación, la burbuja ha recorrido ya los centímetros que la separan de la superficie de la bebida; acaba con un diámetro de un milímetro aproximadamente. Como un

iceberg, una burbuja emerge sólo un poco de la superficie del líquido; la mayor parte de su volumen queda por debajo de la superficie. La parte emergida, la cofia de la burbuja, es una película líquida hemisférica que adelgaza progresivamente a causa del drenaje por los costados. Cuando la cofia de una burbuja llega a un cierto espesor crítico, se hace sensible a las vibraciones y gradientes térmicos, con lo que al fin se quiebra. En 1959, dos físicos, cada uno por su lado, Geoffrey Ingram Taylor, de la Universidad de Cambridge, y Fred E. C. Culick, del Instituto de Tecnología de California, mostraron que la tensión superficial abre en la cofia un orificio que se propaga con gran rapidez. En burbujas de tamaño milimétrico, esa desintegración dura de 10 a 100 microsegundos (*véase el recuadro* “Muerte de una burbuja”).

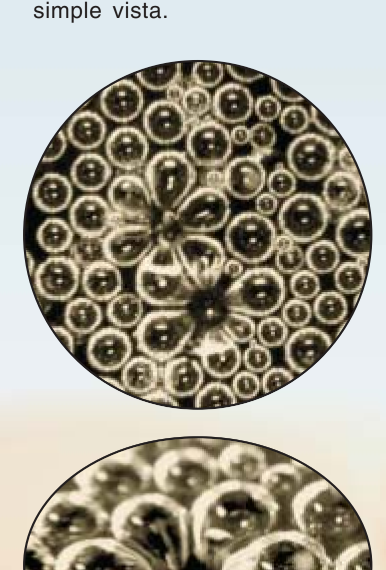
A la rotura de la cofia sigue un complejo proceso hidrodinámico, que provoca el colapso de la parte sumergida. Durante un instante permanece abierta en la superficie del líquido una cavidad. Después, los costados de ésta, al precipitarse hacia dentro, se encuentran; lanzan entonces un chorro de líquido a gran velocidad por encima de la superficie libre. A causa de esa gran velocidad, el chorro se hace inestable; desarrolla una onda de capilaridad (la inestabilidad de Rayleigh-Plateau) que lo fragmenta en gotículas. A éstas, la inercia y la tensión superficial les van dando toda una variedad de formas, a menudo sorprendentes. Finalmente, adquieren una forma casi esférica. Como cada segundo revientan centenares de burbujas, erizan la superficie de la bebida efímeras estructuras cónicas, de vida demasiado corta para observarlas a simple vista.

La vida media de una burbuja es un criterio importante del que dependen la existencia y la estabilidad del collarín. Las burbujas demasiado efímeras no tienen tiempo de alcanzar la superficie e incorporarse al collarín. Las que viven demasiado pueden acabar creando una capa espesa de burbujas, que daría al champán el aspecto denso de la espuma de cerveza. A simple vista, se comprueba ya que la duración de las burbujas se alarga a medida que el champán lleva más tiempo en la copa, que cada vez escasean más los reventones de burbujas. A causa de los movimientos convectivos en el líquido y del baile incesante de las burbujas, las macromoléculas tensioactivas del champán se desplazan a la superficie, que las adsorbe y, en consecuencia, adquiere mayor rigidez. El drenaje y el adelgazamiento que preceden la rotura de la película de las burbujas se lentifican. Las burbujas se estabilizan poco a poco. Según nuestras mediciones, la duración de la vida de una burbuja en la superficie varía de unas décimas de segundo, nada más verter el champán, a varios segundos.

Cuando se echa el champán en la copa, se forma una espuma apreciable, se espesa y enseguida baja hasta que no queda más que una capa de burbujas de una sola burbuja de espesor. Hemos estudiado las consecuencias que tiene el reventón de una burbuja en sus vecinas en esa capa, que no perdura más de unos segundos. En ese breve lapso estallan centenares de burbujas. Por medio de técnicas macrofotográ-

MUERTE DE UNA BURBUJA

AL FINAL REVIENTAN: El colapso de una burbuja de champán empieza casi en el instante en que asoma a la superficie del líquido (*la secuencia de la derecha*). En la segunda imagen, la fina película líquida que constituye la parte emergida de la burbuja acaba de quebrarse. Durante tan brevísimo evento, la forma de la burbuja (casi un milímetro de ancho) no varía. El colapso de la cavidad origina un chorro de líquido que vuela a gran velocidad por encima de la superficie (*tercera imagen*). A causa de su propia velocidad, ese chorro se vuelve inestable; se crea una onda de capilaridad que descompone el chorro en gotículas. Tras escanciar, cada segundo revientan centenares de burbujas, por lo que la superficie de la bebida queda sembrada de espigas cónicas, por desgracia de vida demasiado corta para observarlas a simple vista.



RAMILLETES DE BURBUJAS: Como el desfallecimiento de las burbujas superficiales es tan rápido (menos de 100 microsegundos), no son muchas las tomas fotográficas que puedan captarlo. Las burbujas del champán se arraciman y construyen hermosas estructuras florales (*izquierda*) cuando las deforma la succión originada al reventar una burbuja próxima. Las cofias de las burbujas contiguas a las zonas centrales libres de burbujas se alargan hacia las cavidades ya vacías.








TOSHIO NAKAJIMA *Photonica*; CORTESIA DE GÉRARD LIGER-BELAIR (*insertos*)

ficas, con iluminaciones muy cortas, hemos observado estructuras fugaces en forma de flor; los pétalos son burbujas muy deformadas que apuntan hacia el centro. Paradójicamente, una burbuja que revienta no sopla contra las burbujas vecinas, sino que las aspira. De ahí la deformación, antes de que recuperen su forma clásica.

Aroma y sabor

Consideraciones estéticas aparte, al reventar las burbujas en la superficie libre salen disparados, a una velocidad de varios metros por segundo, chorros de gotitas que se alzan unos centímetros sobre la superficie. Alcanzan así los órganos sensoriales humanos: durante la degustación, estimulan los nociceptores (receptores del dolor) de la nariz; cuando estallan en la lengua, estimulan los receptores táctiles de la boca. Al reventar, las burbujas liberan asimismo una solución acuosa levemente ácida.

Según se cree, las burbujas que revientan en la superficie no sólo causan estimulaciones mecánicas, sino que representan un papel esencial en la liberación de sabores y aromas. Las estructuras moleculares de muchos compuestos aromáticos de las bebidas carbonatadas son tensioactivas; se adhieren a las de las burbujas que suben y crecen en el seno del líquido. Esas moléculas se concentran en la superficie. Por eso se piensa que, al reventar, las burbujas rocían el aire con nubes de minúsculas gotitas que contendrían altas concentraciones de moléculas aromáticas, potenciadoras de los sabores de las bebidas. Tenemos pensado cuantificar ese efecto de liberación de sabor para cada una de las numerosas moléculas aromáticas del champán.

La efervescencia del champán es un instrumento precioso para estudiar la química física de la ascensión, expansión y destrucción de las burbujas. Confiamos en que los lectores, a partir de ahora, sepan mirar una copa de champán de modo distinto.

Bibliografía complementaria

THROUGH A BEER GLASS DARKLY. Neil Shafer y Richard Zare en *Physics Today*, vol. 44, págs. 48-52; 1991.

BEAUTY OF ANOTHER ORDER: PHOTOGRAPHY IN SCIENCE. Ann Thomas. Yale University Press, 1997.

THE SECRETS OF FIZZ IN CHAMPAGNE WINES: A PHENOMENOLOGICAL STUDY. Gérard Liger-Belair *et al.* en *American Journal of Enology and Viticulture*, vol. 52, págs. 88-92; 2001.

KINETICS OF GAS DISCHARGING IN A GLASS OF CHAMPAGNE: THE ROLE OF NUCLEATION SITES. Gérard Liger-Belair *et al.* en *Langmuir*, vol. 18, págs. 1294-1301; 2002.

PHYSICOCHEMICAL APPROACH TO THE EFFERVESCENCE IN CHAMPAGNE WINES. Gérard Liger-Belair en *Annales de Physique*, vol. 27, n.º 4, págs. 1-106; 2002.

CURIOSIDADES DE LA FÍSICA

Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Natación de los peces

En francés, en el siglo XVIII, los marineros no remaban, "nadaban", y hoy el remero sentado más cerca de la popa de un "ocho" es el "jefe de nado", que marca el ritmo a seguir por los demás remeros. La expresión tiene un sentido profundo: desde el punto de vista físico, los peces emplean sus aletas a veces como un remo, otras veces como una espadilla, o remo de singa. Mientras que lo primero es ideal para huir, lo segundo es insuperable para nadar rápido y lejos.

¿Cómo se propulsa un pez? Examinemos las fuerzas que se ejercen sobre un cuerpo móvil dentro de un fluido. Un ala de avión, afín a una aleta de pez, sufre dos fuerzas, la resistencia y la sustentación. La resistencia, de sentido opuesto a la velocidad, frena el movimiento de todo móvil en el seno de un fluido. La sustentación es perpendicular a ese movimiento y, como su nombre indica, sostiene en el aire a aviones y aves. Ambas son proporcionales al cuadrado de la velocidad del objeto. La geometría de éste, así como su orientación en el fluido, determinan los coeficientes de proporcionalidad, llamados coeficientes de resistencia y de sustentación. Para un objeto aguzado como un ala de avión, el coeficiente de resistencia es de ordinario diez veces menor que el coeficiente de sustentación. Al propulsarse, los peces se aprovechan ya sea de la resistencia o de la sustentación, o... de las dos a la vez. ¿Cómo?

Propulsión por resistencia

Los peces que se propulsan gracias a la resistencia ejercen fuerza contra el agua como los remeros. Al tirar del remo, el remero de espaldas a la proa desplaza la pala (porción sumergida del remo) de adelante hacia atrás respecto a la embarcación; la fuerza de resistencia que se ejerce sobre la pala se opone a su movimiento. Como apunta hacia adelante, constituye la fuerza propulsora de la embarcación. Para aumentarla, el remero se esfuerza en presentar al agua una superficie máxima cuando tira de la pala sumergida. Para llevarla desde atrás hacia adelante, la saca del agua para no producir una fuerza de resistencia de sentido contrario, que frenaría a la embarcación. La rescaza se propulsa de manera similar: avanza haciendo fuerza sobre sus aletas laterales desplegadas, luego las encoge para llevarlas hacia delante minimizando la resistencia.



BRUNO VACARO

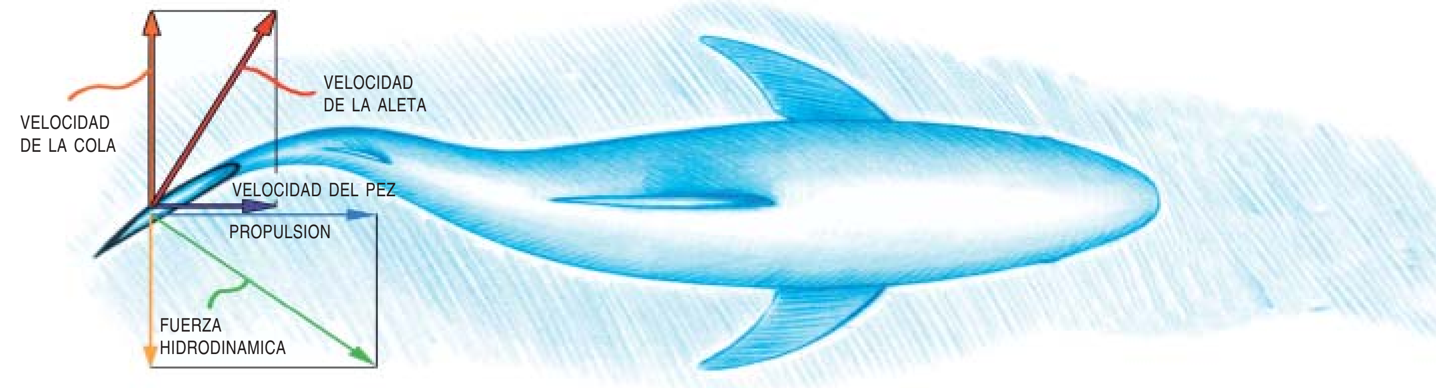
1. Como un remero, la rescaza se propulsa batiendo las aletas laterales. Maniobra así con soltura a poca velocidad

Esta "natación por resistencia" tiene el inconveniente de que sólo es eficaz si la velocidad del remo es mayor que la velocidad relativa del agua respecto al remero: ¡cuanto más rápido nada un pez, menos lo propulsan sus aletas! Fijemos las ideas examinando el caso de unas aletas de diez centímetros cuadrados. Para arrancar, su propietario las lleva hacia atrás a una velocidad de un metro por segundo: la ley que expresa la resistencia indica que las aletas inducen entonces una fuerza de un newton. Cuando un pez avanza a 50 centímetros por segundo, la velocidad relativa de sus aletas respecto al agua cae a 50 centímetros por segundo y la fuerza propulsora que inducen (proporcional al cuadrado de la velocidad) es entonces cuatro veces más pequeña. Si el pez avanzase a un metro por segundo, la fuerza de propulsión se anularía.

Dado que la "natación de resistencia" es tanto más eficaz cuanto menor es la velocidad, la mayoría de los peces la emplean para maniobrar a baja velocidad; por añadidura, también les sirve para escapar desde la inmovilidad. En vez de practicar el "remo de crucero", azotan el agua con su aleta caudal. Por ejemplo, las truchas, al huir, se pliegan en forma de C, antes de desplegarse como un rayo desplazando el agua hacia atrás. Consiguen así aceleraciones de varias decenas de metros por segundo al cuadrado (la aceleración g de la gravedad vale casi diez metros por segundo al cuadrado); flecha multicolor, la trucha arco iris se despliega en 80 milisegundos y consigue una aceleración de $4g$. Los peces no tienen la exclusiva de los arranques fulminantes, pues los camarones alcanzan más de $10g$ en la salida parada.

Propulsión por sustentación

Los peces que se propulsan merced a la sustentación practican una técnica similar a la singa. La sustentación es normal al movimiento de la aleta respecto al agua. Para que esa fuerza apunte hacia adelante, el pez mueve en vaivén su aleta caudal perpendicularmente a la dirección de avance. En eso se basa la singa, técnica de propulsión de las embarcaciones con un único



2. Atunes y tiburones son unos nadadores excelentes, hasta el punto de que atraviesan los océanos. Para nadar rápido y lejos, "singan", es decir, retuercen sus aletas caudales de tal modo que aumentan la fuerza de sustentación (la fuerza motriz hidrodinámica) sobre ellas

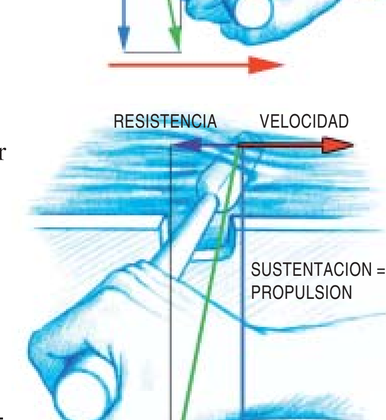
remo. Los marineros que la practican hunden el remo, o espadilla, en el agua por la parte posterior de la embarcación. Cambiando la inclinación en cada pasada, ejecutan un movimiento de vaivén de izquierda a derecha. La pala permanece casi paralela a la popa de la barca, con el borde de ataque un poco hacia delante. La singa exige un buen "juego de muñeca", ya que pierde eficacia cuando la pala no está correctamente situada respecto a la marcha de la embarcación.

La singa posee múltiples ventajas sobre el remo clásico: la continuidad del movimiento le confiere una gran suavidad; además, se adapta mejor al transporte de cargas pesadas. Para convencernos, supongamos que un marinero trata de mover un pontón; para ello, sucesivamente, hace fuerza sobre el fondo con una pértiga, rema y singa. En el primer caso, la pértiga se apoya en el fondo sin resbalar: todo el trabajo del marinero se emplea en propulsar el esquife, pero la profundidad no puede ser mucha. Cuando rema, la fuerza propulsora es la resistencia de la pala. Como ésta se desplaza con respecto al agua, una energía no despreciable se disipa inútilmente (rozamientos, turbulencias). Cuando el marinero singa, la fuerza propulsora no es la resistencia, sino la sustentación, aproximadamente perpendicular al movimiento del remo; y trabaja poco en contra de la espadilla, pues el trabajo de una fuerza normal al movimiento es nulo. Unica fuente de pérdida de energía, la resistencia sobre la espadilla es unas diez veces menor que la sustentación sobre la misma. Así, a fuerza propulsora y velocidad de remo iguales, el marinero disipa diez veces menos energía en el agua cuando singa que cuando rema.

La singa es más eficaz

Además, al revés que el remo, la espadilla aumenta de eficacia con la velocidad. Tomemos como ejemplo una espadilla de diez centímetros de ancho y un metro de largo (la parte sumergida). Movida a un metro por segundo, con la embarcación parada, genera una fuerza propulsora de unos 40 newton (4 kilogramos de fuerza). Si el marinero sigue moviéndose igual cuando la barca va lanzada a un metro por segundo, la velocidad relativa del remo con respecto al agua es de 1,4 metros por segundo aproximadamente (longitud de la hipotenusa del triángulo isósceles formado por las dos velocidades de un metro por segundo) y formando un ángulo de 45º con la dirección de la embarcación. Como la sustentación es proporcional al cuadrado de la velocidad del remo con respecto al agua, será por tanto dos veces mayor que antes. Aunque esa fuerza ya no esté dirigida hacia adelante, su componente en el sentido del movimiento sigue siendo mayor en un 40 por ciento a la fuerza obtenida con la embarcación en reposo.

Estas ventajas explican por qué los marineros chinos y japoneses emplean tanto la singa. En los dos países, se practica con un remo especial que en chino se llama *yuloh*, y *ro* en japonés. Largo y ligeramente encorvado, se instala casi horizontal en la borda de popa. Una cuerda la sujeta por su extremo, de tal suerte que el remero, al no tener que soportar el peso del *yuloh*, puede concentrar sus esfuerzos en imprimirle el vaivén. Modifica asimismo la orientación del remo antes de cada retorno. Una marinero chino hábil mueve un sampán de seis metros de largo a cinco kilómetros por hora.



3. Movimiento de ida y vuelta de la espadilla y fuerzas puestas en juego

Los peces de altura singan

Los mejores nadadores de los mares practican también la singa. Peces y cetáceos poseen un cuerpo masivo terminado por una cola fina rematada por una gran aleta. Vertical en tiburones y atunes, la aleta caudal es horizontal en delfines y ballenas. En forma de ala, su dimensión perpendicular al cuerpo es mayor que su profundidad y su superficie aguzada maximiza la sustentación. Es también muy liviana, lo que permite a los peces, y también a los cetáceos, retorcerla fuertemente para optimizar la sustentación que genera. Ese modo de propulsión es tan eficaz, que algunos atunes alcanzan y mantienen velocidades superiores a 80 kilómetros por hora. Respecto a los tiburones, muchos de ellos se alimentan de atún...

BRUNO VACARO

JUEGOS MATEMÁTICOS

Juan M. R. Parrondo

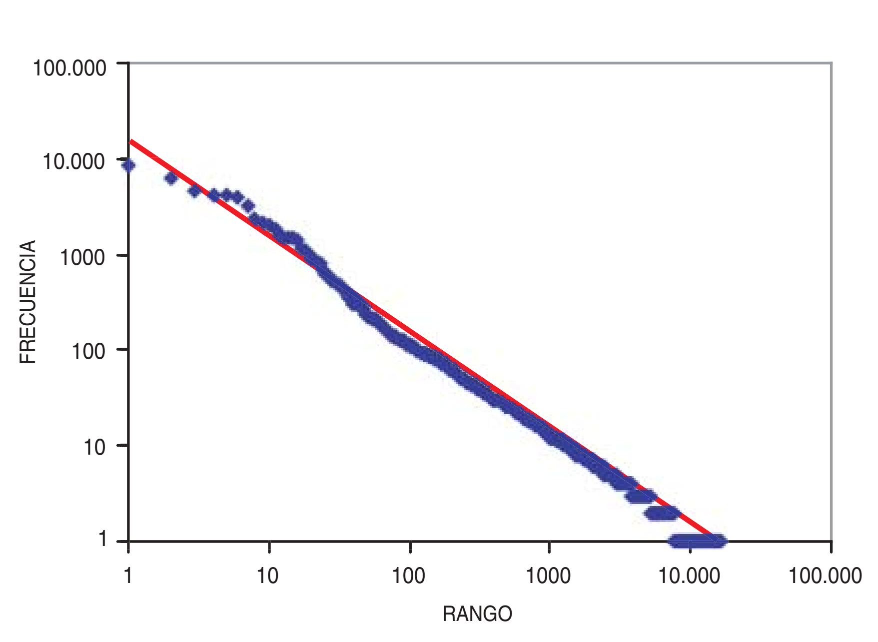
Más sobre números y palabras

En el último artículo de *Juegos matemáticos* exploramos una sorprendente regularidad en la estadística de un texto literario: la ley de Zipf. La ley nos dice que, si ordenamos las palabras que aparecen en un texto de más a menos frecuentes, la frecuencia con la que aparece una palabra en el texto es inversamente proporcional al puesto que ocupa en la lista. Aunque no lo comentamos entonces, la constante de proporcionalidad es aproximadamente igual al número de palabras diferentes que aparecen en el texto. Es decir, la frecuencia de una palabra es:

$$f(r) = \frac{V}{r}$$

en donde V es el vocabulario del texto, es decir, el número de palabras *diferentes* que aparecen en él, y r el rango de la palabra, o lugar que ocupa en la lista en la que todas las palabras del texto se ordenan de más a menos frecuentes.

Veamos un ejemplo. En la novela de Gabriel García Márquez *Cien años de soledad*, que tiene un vocabulario de 16.019 palabras, la palabra "de" es la más común y aparece 8684 veces. Como es la palabra más común, su rango es 1 y la fórmula de la ley de Zipf predice para "de" una frecuencia igual a 16.019. Esta cifra es casi el doble de la frecuencia real de la palabra, por lo que parece, en principio, que la ley falla estrepitosamente. Si la aplicamos a las siguientes palabras de la tabla, vemos que la discrepancia es menor, pero sigue siendo considerable. Sin embargo, esas discrepancias no son tan grandes como aparentan si uno observa la figura 1, en donde se dibujan las frecuencias de cada palabra (*puntos azules*) junto con la predicción de la ley de Zipf (*línea roja*).



1. Los puntos azules muestran la relación entre la frecuencia y el rango de todas las palabras que aparecen en Cien años de soledad. *La línea roja es la ley de Zipf. Tanto la escala vertical como la horizontal son logarítmicas, lo cual enmascara ligeramente las discrepancias entre la ley y los datos reales*

Existen algunas modificaciones de la ley de Zipf que se aproximan mejor a las frecuencias reales de las palabras. Comentamos algunas de ellas en al artículo del mes pasado. Sin embargo, la ley de Zipf original, aunque es sólo válida de modo aproximado, permite hacer algunas predicciones interesantes acerca de la estadística de un texto. Una de ellas es la relación entre el tamaño de un texto, o número total de palabras que lo componen, y su vocabulario. Esta relación nos da una idea de la riqueza de vocabulario de cada texto. El tamaño N de un texto se puede obtener sumando todas las frecuencias del vocabulario:

$$N = f(1) + f(2) + f(3) + \ldots + f(V)$$

Si las frecuencias verifican la ley de Zipf, entonces la suma es:

$$N = V\left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \cdots + \frac{1}{V}\right)$$

La suma entre paréntesis se puede realizar de modo aproximado, cuando el vocabulario es muy grande (al lector con algunos conocimientos de matemáticas superiores no le resultará difícil entender que esta aproximación consiste en sustituir la suma por una integral de la función $1/r$). El resultado es

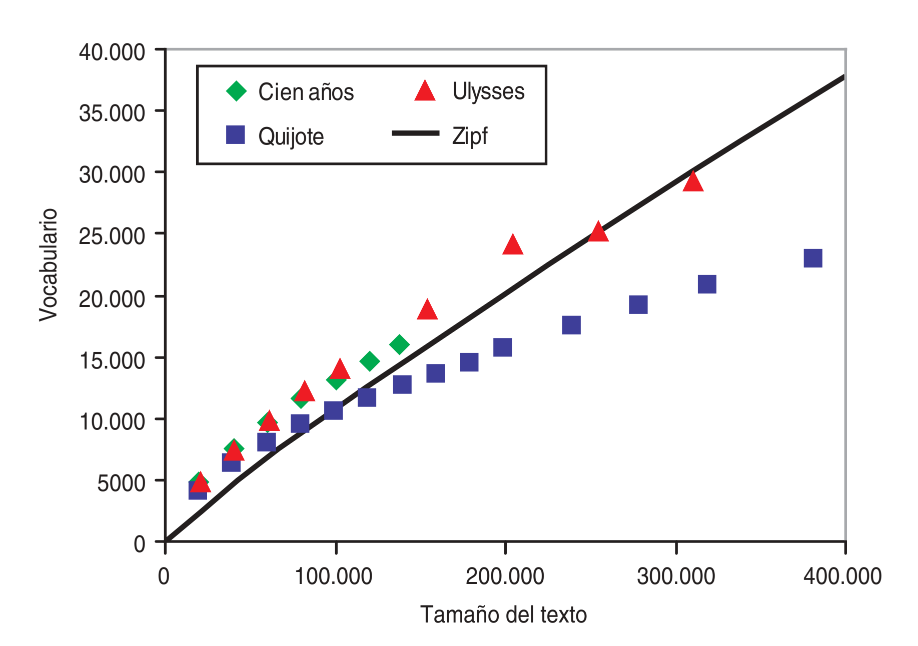
$$N = V \ln V$$

en donde ln es el logaritmo neperiano. Esta sencilla fórmula nos indica la relación entre el tamaño y el vocabulario de un texto. En principio es válida para cualquier texto, siempre que éste cumpla la ley de Zipf. Como esta ley se aplica a cualquier tipo de texto en cualquier idioma, el resultado sorprendente es que todos los textos en todos los idiomas tienen aproximadamente la misma riqueza de vocabulario.

Veamos hasta qué punto es esto cierto. En la figura 2 pueden ver la relación entre el tamaño del texto y el vocabulario para *Cien años de soledad*, *Don Quijote* y la versión inglesa del *Ulysses* de James Joyce. En cada libro vemos cómo el vocabulario va creciendo en función del tamaño del texto. Finalmente, la curva negra es la fórmula que acabamos de deducir a partir de la ley de Zipf. Observen que la fórmula nos da el tamaño a partir del vocabulario, mientras que en la gráfica dibujamos la relación inversa, es decir, el vocabulario en función del tamaño del texto. Sería deseable despejar V en función de N en la ecuación anterior, pero esto no es posible y por lo tanto no disponemos de una fórmula sencilla y compacta que nos diga el vocabulario de un texto de tamaño dado. Sin embargo, esto no es ningún problema para el programa informático que he utilizado para dibujar la curva negra de la figura 2 a partir de la fórmula $N = V \ln V$.

De nuevo, a pesar de que existen ciertas discrepancias, la fórmula nos ofrece una descripción aproximada de cómo aumenta el vocabulario en cada texto. La novela que más se aleja del resultado teórico es *El Quijote*, cuyo vocabulario es menor del que se espera, es decir, en la segunda parte de la novela aparecen menos palabras nuevas de las que predice la ley de Zipf.

Observen que el crecimiento del vocabulario no es proporcional al tamaño del texto. En principio uno podría pensar que en un texto la fracción de palabras distintas, es decir, el vocabulario dividido por el tamaño, es constante. Sin embargo, no puede ser así porque, cuanto mayor es el texto, más difícil es encontrar palabras que no hayan aparecido con anterioridad. De hecho, la fórmula del logaritmo neperiano tiene una propiedad que no pueden verificar los textos reales. El vocabulario crece indefinidamente con el tamaño del texto, lo cual es imposible porque el número total de palabras de una lengua, incluyendo todas las variantes morfológicas —plurales, conjugaciones verbales, etc.— es finito. Quizás esta finitud en el léxico de la lengua es lo que hace que el vocabulario de *El Quijote* no alcance las predicciones de la ley de Zipf. Algunos investigadores han desarrollado fórmulas más complejas que tienen en cuenta estas limitaciones y se adaptan a todo tipo de texto. Con ellas deducen también relaciones entre el vocabulario y el tamaño, utilizando técnicas matemáticas refinadas. Como ven, la estadística es capaz de encontrar y cuantificar regularidades en algo tan humano como es el uso del lenguaje, e incluso en su vertiente más personal y creativa: la literatura.



2. Cómo crece el vocabulario en tres conocidos textos en función del tamaño o número total de palabras. La curva negra representa el resultado derivado a partir de la ley de Zipf

RANGO	PALABRA	FRECUENCIA	LEY DE ZIPF
1	**de**	8684	16.019
2	**la**	6110	8010
3	**que**	4679	5340
4	**y**	4147	4005
5	**el**	4054	3204
6	**en**	3880	2670
7	**a**	3162	2288
8	**los**	2373	2002
9	**se**	2142	1780
10	**con**	1983	1602
11	**un**	1785	1456
12	**las**	1535	1335
13	**una**	1505	1232
14	**por**	1465	16.019

Palabras más frecuentes en Cien años de soledad. *La tercera y cuarta columna indican la frecuencia real de cada palabra en el texto y la predicción dada por la ley de Zipf*

Mark Fischetti

Balística. Cuando las rayas coinciden

La resolución de un caso como el de los tiradores que, emboscados, mataron a varias personas cerca de Washington durante el pasado mes de octubre depende de la identificación de las armas. ¿Cómo ligan los peritos las pruebas materiales a un arma concreta? Si se halla un arma de fuego, un experto forense la disparará en el laboratorio para determinar las marcas que deja en las balas y vainas. Luego, valiéndose de un microscopio, comparará esas marcas con una serie de características de las balas y vainas recogidas en la escena del crimen: el calibre (diámetro), el patrón de rayado (el conjunto de surcos) y las impresiones y estriaciones (marcas microscópicas únicas que dejan las imperfecciones de la aguja de percusión y el ánima del arma).

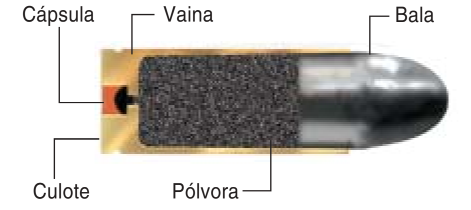
En Estados Unidos, si las pruebas de disparo son negativas, o si no se halla el arma, el perito medirá los patrones de rayado de la munición recuperada y los contrastará con los contenidos en la base de datos Características Generales de Rayado para ver a qué modelos de arma podrían corresponder. Pero en algunos casos, según Scott Doyle, especialista forense de la policía del estado de Kentucky, el problema es que "de 20 a 150 marcas de armas de fuego podrían dejar el mismo patrón de rayado."

Si el perito necesita subir un peldaño, hará fotos de las impresiones y estriaciones y las remitirá informáticamente a la Red Nacional Integrada de Información Balística (NIBIN), supervisada por la Oficina Federal de Alcohol, Tabaco y Armas de Fuego (ATF) y el FBI. A diario, los científicos forenses cargan las imágenes de los disparos de ensayo y las pruebas de las escenas de crímenes en los ordenadores de la NIBIN. En cada caso, ésta remite unas diez coincidencias, las mayores que se hayan encontrado, de haberlas, y concreta qué armas podrían haber disparado esa munición. Seguidamente, el perito debe contrastar a mano esas imágenes con las suyas propias.

Los tiroteos furtivos han desencadenado un debate acerca de si la ATF debe convertir la NIBIN en una suerte de sistema nacional de huellas dactilares balísticas. Se requeriría a todos los fabricantes de armas de fuego que hicieran disparos de prueba de cada nuevo modelo e introdujeran las imágenes en la NIBIN. Ese sistema sería una ayuda, pero no una panacea. Las marcas de un arma pueden variar si el ánima se oxida con el tiempo; asimismo, los delincuentes pueden amañar el ánima, afirma Robert Shem, perito jefe del Laboratorio Criminal de Alaska, en Anchorage. "Siempre hará falta un experto humano que compare las pruebas con un microscopio para decir: 'Sí, esta bala procede de esta arma'."

DANIELS & DANIELS; FOTOGRAFIAS DE BALISTICA: SCOTT DOYLE, DE WWW.FIREARMSID.COM

1. LOS CAÑONES DE LAS ARMAS tienen rayados de ánima diferentes. Entre los patrones más corrientes están los de 4/derecha (cuatro mesetas y surcos, con hélice a la derecha) (*a la derecha, al final*), los de 8/izquierda, etc. Cada uno de ellos talla su imagen inversa sobre la bala al ser ésta propulsada por el interior del ánima (*a la derecha, segunda fotografía*). Además, cada meseta y surco imprime en la bala sus propias y únicas estriaciones microscópicas (*a la derecha, tercera fotografía*).



2. CUANDO SE APRIETA EL GATILLO DE UN ARMA la aguja de percusión se proyecta contra la cápsula, que inflama la pólvora. La explosión de ésta impulsa hacia atrás la vaina contra el frente del cierre y fuera del arma, tras lo cual le quedan grabadas unas señales reveladoras, e impulsa el proyectil hacia adelante. Una hélice de mesetas y surcos poco profundos le imparte un movimiento giratorio, como el de un balón en el aire, para mejorar la precisión de su vuelo.

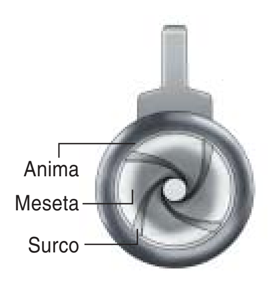
¿SABIA USTED QUE...?

➤ **CALIBRE X:** Una bala del calibre 22 tiene un diámetro aproximado de 0,22 pulgadas (5,6 mm). La designación que suele figurar en la vaina comprende el calibre, el nombre del fabricante y los adjetivos que identifican las variantes: .32S&W Long indica una bala Smith & Wesson del calibre 32 (8,1 mm), más larga que el modelo estándar. Las vainas halladas tras los tiroteos de los furtivos de Beltway eran .223; el "3" indica no una medida, sino un cartucho Remington del calibre 22 alargado para contener más pólvora y propulsar la bala a mayor velocidad. En EE.UU. se venden más de 25 modelos de rifles .223.

➤ **ENCAJAR LAS PIEZAS:** Gradualmente, el FBI está ampliando tres bases de datos nacionales, en fase de alumbramiento aún, para ayudar a los investigadores forenses. El Sistema Integrado de Identificación Dactilar Automática alberga 40 millones de juegos de huellas dactilares de antiguos sospechosos y ex convictos. El Sistema Indice Combinado de ADN posee 1,2 millones de perfiles de ADN. Y la Red Nacional Integrada de Información Balística dispone de medio millón de imágenes de balas y cartuchos. En cada caso, los peritos locales cargan los datos procedentes de escenas de crímenes y buscan coincidencias entre los casos resueltos y no resueltos. A los grupos pro libertades civiles les preocupa que pudiera abusarse de esa información.

➤ **TANQUES DE AGUA:** Los verificadores de armas de fuego las prueban disparándolas desde un extremo de un tanque de agua rectangular de unos noventa centímetros de ancho, otros tantos de alto y tres metros de largo. Una bala de revólver recorre sólo un metro y medio aproximadamente antes de caer al fondo. "El rozamiento es tremendo", dice el especialista Scott Doyle, "y el proyectil no tarda en perder su energía".

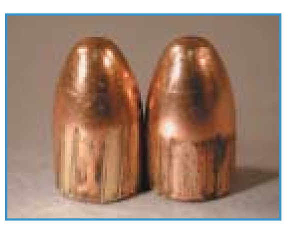
Frente del cierre
Aguja de percusión
Vaina usada (se expulsa)
Explosión de la pólvora
Rayado
Gatillo



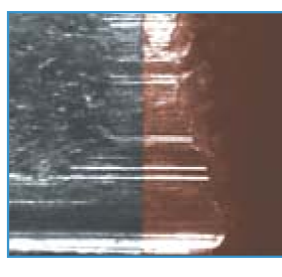
3. LOS PERITOS se valen de un microscopio comparador para inspeccionar, unas junto a otras, las marcas impresas en vainas y balas bajo ampliaciones de 5× y 40×.



4. LAS MARCAS DEL CIERRE en la base de una vaina hallada en la escena de un crimen (*derecha*) coinciden con las marcas de la vaina de un cartucho disparado en el laboratorio por un arma recogida en el lugar del crimen (*izquierda*).



5. ESTAS DOS BALAS tienen seis impresiones de mesetas y surcos a derechas, pero de pasos distintos, lo que revela que fueron disparadas por armas distintas.



6. LAS ESTRIACIONES DE UNA BALA hallada en la escena de un crimen (*izquierda*), causadas por minúsculas imperfecciones únicas de las mesetas y surcos de un arma, coinciden con las estriaciones de una bala disparada en el laboratorio con un arma criminal (*derecha*).



7. UN FRAGMENTO MUY DESGARRADO de una bala aún muestra suficientes impresiones de mesetas, surcos y estriaciones como para ayudar a los peritos a resolver un crimen.

LIBROS

La doble hélice

y su arqueología

ETABLIERUNG EINES RASSENHYGIENISCHEN STANDARDWERKES 1921-1941. DER BAUR-FISCHER-LENZ IM SPIEGEL DER ZEITGENÖSSISCHEN REZENSIONLITERATUR, por Heiner Fangerau. Peter Lang; Frankfurt, 2001.

THE BIOLOGY OF NUMBERS. THE CORRESPONDENCE OF VITO VOLTERRA ON MATHEMATICAL BIOLOGY, por Giorgio Israel y Ana Millán Gasca. Birkhäuser; Basilea 2002.

AUTARKIE UND OSTEXPANSION. PFLANZENZUCHT UND AGRARFORSCHUNG IM NATIONALSOZIALISMUS. Dirigido por Susanne Heim. Wallstein Verlag; Göttingen, 2002.
THE TANGLED FIELD. BARBARA MCCLINTOCK'S SEARCH FOR THE PATTERNS OF GENETIC CONTROL, por Nathaniel C. Comfort. Harvard University Press; Cambridge, Massachusetts, 2001.

BIOLOGY OF DROSOPHILA. Edición preparada por M. Demerec. Cold Spring Harbor Laboratory Press; 1994.

DESIGNS FOR LIFE. MOLECULAR BIOLOGY AFTER WORLD WAR II, por Saraya de Chadarevian. Cambridge University Press; 2002.

A la hora de historiar los pasos previos al descubrimiento de la estructura en doble hélice del ADN por James Watson y Francis Crick hace ahora medio siglo, podemos mirar el hilo de continuidad que parte de 1919 cuando Phoebus Aaron Levene propone la estructura tetranucleotídica de esa molécula, conoce un hito señalizador en 1928 con la observación del fenómeno de la transformación bacteriana por Frederick Griffith y se encauza definitivamente en 1944, año en que Oswald Avery, Colin MacLeod y Maclyn McCarty establecen la identidad química del principio transformante de Griffith; dicho de otro modo, el ADN constituye el material hereditario. Hallazgo importante subsiguiente será el de Erwin Chargaff, en 1949, sobre la igualdad entre bases púricas y bases pirimidínicas. Y, sobre todo, la distinción establecida en 1951 por Rosalind Franklin entre las dos formas de ADN, la forma B paracristalina y la forma A cristalina; un año después, Rosalind Franklin y Raymond Gosling producen un patrón de difracción de rayos X de la forma B de la molécula de ADN.

Podemos trascender ese horizonte ceñido y ampliar el panorama con la contemplación de otras líneas de trabajo que se ocupaban del problema de la herencia. En particular, la eugenesia (*Etablierung eines rassenhygienischen Standardwerkes 1921-1941. Der* Baur-Fischer-Lenz *im Spiegel der zeitgenössischen Rezensionliteratur*), la biometría (*The Biology of Numbers. The Correspondence of Vito Volterra on Mathematical Biology*), la mejora vegetal (*Autarkie und Ostexpansion. Pflanzenzucht und Agrarforschung im Nationalsozialismus* y *The Tangled Field. Barbara McClintock's Search for the Patterns of Genetic Control*) y la citogenética de *Drosophila* (*Biology of Drosophila*).

Erwin Baur, Eugen Fischer y Fritz Lenz publicaron en 1921 una obra conjunta famosa, *Grundriss der menschlichen Erblichkeitslehre und Rassenhygiene*, renovada en varias ediciones. Mereció la reseña favorable, con raras excepciones, de las principales revistas científicas de todo el mundo. Iban firmadas por académicos sobresalientes en su especialidad. Lo paradójico del caso es que esos fundamentos de genética y pureza racial contenían los conceptos que establecieron, mucho antes de 1933, la ideología racista y estatalista del Tercer Reich. De ese baldón, enmarcado en el contexto eugenésico, se ocupa la tesis doctoral de Heiner Fangerau. Desde principios del siglo XX el darwinismo social venía primando, a un lado y otro del Atlántico, una serie de doctrinas eugenésicas, de "higiene racial", que prometían una nueva sociedad de hombres más sanos e intelectualmente más vigorosos. Mediante, Darwin *dixit*, la selección natural o dirigida.



Vito Volterra

Baur, Fischer y Lenz sistematizaron esa nebulosa de ideas en una estructura rigurosa, en la que se articulan la genética, la antropología y las enfermedades hereditarias. La obra se convirtió muy pronto en el tratado de referencia sobre higiene racial para sus contemporáneos, hasta 1945. ¿Quiénes eran sus autores? Baur estudió medicina y botánica en las universidades de Heidelberg, Estrasburgo y Kiel. Consagró toda su vida a la agronomía y genética vegetal, desde la cátedra de botá-

nica en la Universidad de Berlín hasta la fundación del Instituto Kaiser Wilhelm de Müncheberg, pasando por la creación de publicaciones periódicas de investigación y aplicación de la mejora vegetal. A comienzos de los años treinta se puso al frente del programa de autoabastecimiento alemán con plantas autóctonas, aclimatadas o mejoradas. Fischer se había formado en medicina en la Universidad de Friburgo, graduado con una tesis sobre el aparato genital de la hembra del orangután y dedicado a la antropología, con particular aplicación de las leyes de Mendel a la descendencia humana. En pleno apogeo nazi fue jefe del servicio de salud genética que alentaba la esterilización de los portadores de enfermedades transmisibles. Lenz, médico y discípulo del anterior, se hizo famoso por postular abiertamente la selección negativa como la mejor terapia para atajar las enfermedades hereditarias. Durante el esplendor hitleriano dirigió el Instituto Kaiser Wilhelm de Antropología en Berlín. Solía recordar que las páginas del *Mein Kamp* sobre eugenesia se inspiraron en su texto compartido con Baur y Fischer.

El manual, en dos volúmenes, describía la distribución de las razas, sus diferencias, la degeneración e involución de los pueblos, desde una perspectiva genética fundamental. La aportación de Baur consistió, justamente, en las causas, es decir, en la doctrina sobre la variabilidad y la herencia, con una introducción a las leyes de Mendel, los ensayos de Morgan con *Drosophila melanogaster* y sus propias investigaciones sobre *Antirrhinum majus*. Fischer expuso los criterios antropológicos de las diferencias raciales, desde los morfológicos (cráneo, color de ojos y pelo) hasta los fisiognómicos. Prima los criterios genéticos sobre los rasgos anatómicos. Lenz se reserva la higiene racial. Para depurar la constitución genética del pueblo alemán deben resaltarse las características raciales nórdicas, apunta.

Vinculados a la eugenesia, Francis Galton y Karl Pearson, director éste de *Biometrika* y *Eugenics*, dotaron a la genética cuantitativa de un poderoso útil matemático, la estadística, en cuyo desarrollo participó de forma destacada Vito Volterra. Iba el italiano más lejos en su afán de acomodar el modelo mecánico a la biología de poblaciones en general. Explicó con notable éxito el comportamiento dinámico de las especies en los ecosistemas. Para matematizar, mediante ecuaciones diferenciales, el comportamiento de una población partía del modelo elemental de depredador-presa. De sus cálculos infirió tres leyes: las curvas son funciones periódicas de tiempo, con períodos iguales que dependen de los coeficientes de proporcionalidad de ambas especies y del número de partida de las mismas; el número promedio de individuos de una y otra especie tiende a un valor constante; si los individuos de ambas especies mueren en razón uniforme y proporcional a su número, el número promedio de individuos de la especie depredada aumenta, en tanto que disminuye el número promedio de la especie depredadora.



Barbara McClintock

Aparte de su importancia cardinal en los estudios poblacionales, a los que justificadamente se dedica el grueso de la introducción de Millán, Volterra prestó también atención a la genética y evolución. A este capítulo conciernen las cartas intercambiadas con Raymond Pearl, el biómetra de los genéticos alemanes de los años veinte y treinta. En la primera carta Pearl agradece a Volterra la remisión de su libro "Lecciones sobre la teoría matemática de la lucha por la vida". Aunque la relación es tardía y, hasta cierto punto, interesada. Volterra ha escrito un *Calcolo delle variazioni e equazioni di Pearl*, que reduce a un problema de mínimos; se trata de un caso análogo a lo que "sucede para el movimiento de los cuerpos en la dinámica según el principio de Hamilton-Maupertuis. Existe ahí una analogía cabal entre la dinámica de los sistemas demográficos y la dinámica de los sistemas materiales". El italiano desea la publicación de este artículo en la revista de Pearl. Sin éxito se esforzó por ver algún trabajo suyo en las páginas de la *Biometrika* de Pearson. Lo que no fue óbice para que la historia de la genética de poblaciones le reconociera su aportación.

La mejora vegetal había entrado en los *curricula* universitarios alemanes en 1870.

Desde finales del siglo XIX había en Alemania institutos de economía agraria en ocho universidades. Se establecieron Escuelas Superiores de Agrónomos en Munich, Berlín, Bonn y otras ciudades. Son objeto de atención los cereales y la patata, en los que trabajan Ferdinand Heine, Gustav Bestehorn, Otto Beseler, Friedrich Strube y Otto Cimbal. El rendimiento de los cereales ha subido hacia 1900 un 30-40 por ciento y más de un 100 por ciento el de la patata. Aparece en 1889 el primer manual universitario de mejora vegetal, escrito por Kurt von Rümker,

Clásicos contemporáneos

MEDICINE IN THE TWENTIETH CENTURY. Dirigido por Roger Cooter y John Pickstone. Harwood Academic Publishers; Amsterdam, 2000.

Creo que este libro tiene todos los ingredientes para convertirse en una obra clásica de referencia, pues aborda con amplitud y originalidad una materia de obligado estudio y ejemplifica en sus páginas las características metodológicas claves de los últimos 25 años de historia social de la medicina y de la ciencia (el abordaje analítico, la visión social y cultural —desde fuera y desde abajo— y la agudeza crítica, que conduce tanto a la problematización de los supuestos científicos como a una visión menos heroica y altruista de las intervenciones institucionales).

La *historia de la medicina del siglo XX*, que sería el título en castellano del libro que coeditan Cooter y Pickstone, reúne 51 autores, 31 hombres y 20 mujeres, todos de procedencia anglosajona, salvo cinco o seis. Se compone de un detallado sumario, una introducción general, cofirmada por los editores, tres partes temáticas (Poder, Cuerpo, Experiencia) y un índice de materias. Cada una de las tres partes, que sólo se separan en el sumario, no en el cuerpo del texto, se compone de un número variable de capítulos, que son 12 en la primera (extendida a lo largo de 185 páginas), 18 en la segunda (298 páginas) y 16 en la última (251 páginas). Los capítulos, en general anotados de forma parca (salvo un par de excepciones), se acompañan de una bibliografía selecta, de abrumadora autoría anglosajona. El libro carece de un capítulo bibliográfico unificado y esta es una carencia apreciable La otra faceta negativa que conviene resaltar es que el ámbito geopolítico del estudio se centra, casi exclusivamente, en el área de procedencia de los autores, es decir Inglaterra y Estados Unidos.

El plan del libro es original, como ya he dicho, y es un valor que va más allá de un hallazgo estilístico afortunado. Dentro del apartado "Poder" se estudian los aspectos estructurales de la presencia médica en el mundo, su papel como fuerza política y conformadora de la sociedad (la organización médica en la Europa de entreguerras y la era progresista; medicina y el estado del bienestar y su crisis; medicina colonial y postcolonial; la industria farmacéutica y tecnológica). Los dos primeros capítulos tienen un enfoque general, el de Pickstone sobre las grandes etapas de la medicina del siglo XX y el de Brandt y Gardner sobre las novedades científico-médicas. La tipología del primero (medicina reparadora, medicina comunitaria, medicina de consumo) me parece un hallazgo analítico; naturalmente, no se trata de episodios estancos, sino de tendencias alternativamente dominantes a lo largo de la centuria: una medicina al servicio de la reproducción de la fuerza de trabajo, una medicina pública presidida por una noción de solidaridad y una medicina como oferta mercantil a los consumidores. La sección dedicada al "Cuerpo" es deudora de una de las más fecundas tendencias de la historiografía cultural contemporánea, aquella que identifica el cuerpo como el marco en que se anudan los discursos (del poder, de la ciencia, de la creencia). Sus distintos capítulos abordan los aspectos cambiantes de estos discursos y sus repercusiones sobre la materialidad de su objeto, desde "el cuerpo historiográfico" y "el cuerpo sano" al "cadáver" (el cuerpo muerto), pasando por el cuerpo industrial, tercer mundista, temporal, sexual, enfermo, discapacitado o ético, entre otros. La sección "Experiencias" une los trabajos en los que se presentan los cambios en la percepción de los actores acerca de su identidad, las relaciones entre profesionales y población y los espacios del ejercicio médico. Aquí se recoge la visión desde el paciente, a la vez que el devenir profesional y las organizaciones de autoayuda. El capítulo que cierra el libro presenta la medicina china contemporánea, como caso particular de relación dialéctica entre culturas.

Es imposible discutir los contenidos de este libro en el espacio de una reseña; cada autor y cada capítulo merecen reflexión y comentario. Por otra parte, en muchas de las aportaciones se encuentran interesantísimas reflexiones sobre el futuro inmediato, a partir del análisis desarrollado, en la línea que marca el capítulo inicial de Pickstone. En suma, se trata de un libro imprescindible, muestra de la calidad de la historiografía anglosajona actual en historia de la medicina. Y si no cabe deducir que la medicina del siglo XX se haya vivido de la misma manera en todos los rincones del mundo industrializado y postindustrial, sí es un notable aviso acerca de los aspectos a considerar al abordar su historia en otros espacios nacionales. —*Esteban Rodríguez Ocaña*

profesor de la Universidad de Göttingen. Cuatro años antes se había fundado la Sociedad Alemana de Economía Agraria. Obviamente el redescubrimiento de las leyes de Mendel impulsa la aplicación de la investigación genética. Los resultados se difunden a través de la revista *Zeitschrift für Pflanzenzüchtung*, fundada en 1912; un año antes había salido ya el volumen inicial de los *Beiträgen zur Pflanzenzucht*. Llegada la república de Weimar, los trabajos en mejora vegetal estarán impulsados, directa o indirectamente, por Erwin Baur.

Desde el Instituto Kaiser Wilhelm de Mejora Vegetal en Müncheberg, Baur y sus colaboradores acometen una intensa labor recolectora de razas y variedades, con viajes a Turquía (1926/28), a España (1928) y a Sudamérica (1930/31); los especímenes traídos sirvieron para crear un banco de semillas. Con la eugenesia fue la mejora uno de los puntales científicos del nacionalsocialismo; ambos compartían un mismo trasfondo ideológico. La denostada "degeneración" afectaba por igual a plantas, animales y hombres. La descripción genética y la mejora convergieron en las expediciones a Afganistán, India y Persia, al Tíbet, en busca de razas puras, "arias".

Encajaba, además, en una política autárquica y militarista, que se proponía liberar al Reich de la dependencia alimentaria del exterior, culpable de la reciente hambruna. Se le encomendó la tarea al instituto de Baur, donde se habían cosechado éxitos como el de Reinhold von Sengbusch, autor de un método de mejora del lupino, a través de cruzamiento y selección, que lo liberó de alcaloides. En 1937 Wilhelm Rudorf publicó un plan programático ("Die politischen Ausgaben der deutschen Pflanzenzüchtung"), en el que podía leerse: "La misión a cumplir en la mejora de las razas de las plantas cultivadas en suelo y clima alemanes debe satisfacer las necesidades de caña de azúcar, fibras, aceite, celulosa, etcétera." Trenzaban el texto dos ideas centrales: la autarquía o autosuficiencia y la concentración de la capacidad productiva en el este. Con el comienzo de la segunda guerra, se ampliaron los campos experimentales.

Con todo, los fundamentos de la agronomía genética los había puesto un ruso, Nicolai I. Vavilov, creador de la teoría de los centros génicos y del método de los retrocruzamientos entre estirpes silvestres y estirpes cultivadas. Sus ideas prendieron en Alemania y en Estados Unidos; en este último también arraigaron las doctrinas eugenésicas, mezcladas con las de mejora. Así en el órgano de la Sociedad Americana de Genética, el *Journal of Heredity*, encontramos en los años veinte y treinta investigaciones agrogenéticas junto con trabajos de eugenesia y genética humana.

Coincide esa época con los primeros pasos de Barbara McClintock en el campo de la investigación del maíz. Objeto de persistente investigación, la biología del maíz es compleja, lo que a la postre le convierte en modelo interesante para el estudio genético. Así, la progenie inmediata de una cruzamiento, los granos, nos ofrece una visión anticipada de la cosecha del año siguiente. Los tejidos de la planta aportan tejido haploide (polen), diploide (embrión y planta de maíz) y triploide (endospermo), que encierran claves importantes para ahondar en las relaciones de dominancia y en los efectos de la carga génica. Desde principios de siglo se conocía el "vigor de los híbridos", que indica que los tales resultan a menudo mayores, más sanos y más productivos que sus parentales de línea pura. George Harrison Shull, a quien debemos tal hallazgo, inventó también la técnica del "doble cruzamiento", que condujo al desarrollo del maíz híbrido agrícola moderno.

Doctorada en 1927 con una tesis sobre citología y genética del primer triploide conocido en esa gramínea, trabajo que apareció dos años después en *Genetics*, la principal revista del campo, McClintock crea muy pronto un pequeño grupo de citogenética del maíz con George Beadle y Marcus Rhoades. Frente a lo que suele repetirse, McClintock no fue la figura solitaria y postergada por sus colegas, una leyenda alimentada por ella misma. Como prueba Nathaniel Comfort con apabullante documentación, recibió honores y reconocimientos desde su juventud como muy pocos. Merecidamente se la elevó a la vicepresidencia (1939) y a la presidencia (1945) de la Sociedad de Genética de América. En 1944 se la nombró miembro de la Academia Nacional de Ciencias, la tercera mujer que alcanzaba tal honor.



De pie: John Kendrew y Francis Crick. Sentados de izquierda a derecha: Hugh Huxley, Max Perutz, Fred Sanger y Sydney Brenner

Una de las mentes más brillantes e influyentes del siglo XX, integró la genética clásica con las observaciones microscópicas del comportamiento de los cromosomas. Primero con la inducción de mutaciones mediante rayos X y luego con su planteamiento del ciclo ruptura-fusión-puente (BFB), McClintock estableció una suerte de parentesco génico entre semillas. El factor o elemento génico que controlaba las tasas de mutación parecía ser un conmutador. (McClintock había recibido en su juventud una beca para estudiar en Europa con Richard Goldschmidt y Hans Spemann, preocupados, como es sabido, por el principio organizador del embrión.) Entre 1946 y 1948 se dedicó por entero a identificar y aislar dicho elemento. En la primavera de 1948 lo había alcanzado, aunque con una presentación inesperada: se trataba de dos elementos y, además, no eran fijos. El descubrimiento de los elementos móviles, a los que ella llamó "elementos controladores", se confirmó independientemente en 1950. Desde mediados de los cincuenta se reputaba por cierto para el maíz.

Buena parte de su labor la realizó McClintock en Cold Spring Harbor, dirigido largos años por Milislav Demerec. Recién graduado en Cornell con un trabajo sobre la herencia de los caracteres de la clorofila en el maíz, había llegado éste al laboratorio en 1923. Muy pronto se centró en la inestabilidad génica en *Drosophila virilis*. Entre 1924 y 1926 halló tres genes inestables en la mosca: reddish, un alelomorfo del locus yellow; una mutación inestable *miniature wing*, y una forma inestable del gen color *magenta*. ¿Cuál era el contexto y el significado de esa búsqueda?

A finales de la primera guerra mundial, nadie discutía el concepto de gen. Se le consideraba el átomo de la herencia, indivisible e independiente de otros genes en su ac-

Genes del desarrollo

From DNA to Diversity, por Sean B. Carroll, Jennifer K. Grenier y Scott D. Weatherbee. Blackwell Science; Malden, 2001.

¿Por qué las serpientes no tienen patas como los demás reptiles? ¿Por qué las moscas tienen dos alas y las mariposas cuatro? Preguntas como éstas, comunes al científico y al lego, son respondidas en este libro, que nos describe los modernos descubrimientos en la biología del desarrollo animal.

La teoría de la evolución de Darwin no explicaba los mecanismos que originaban las variaciones y las perpetuaban en la descendencia, es decir, carecía de una teoría de la herencia. Si bien no resolvió este problema, Darwin apuntó, entre otros temas, la importancia que podría tener para su teoría el estudio comparado del desarrollo embrionario entre distintas especies. Sin embargo, el rechazo a las ideas de Haeckel ("la ontogenia recapitula la filogenia") llevaron a la mayoría de los biólogos a negar que el análisis embriológico pudiera ayudar a entender la evolución. La orientación más experimentalista que dio al campo de la embriología W. Roux, el redescubrimiento de Mendel y la elucidación de los mecanismos de la herencia por el grupo de Morgan hicieron que el estudio del desarrollo quedara alejado de la genética y sin contacto con la teoría evolutiva. Faltaba para esa unión la identificación de los actores principales en el proceso: los genes que determinan el desarrollo.

La irrupción de la biología molecular ha permitido recuperar el nexo entre la genética, la teoría de la evolución y la biología del desarrollo. Los últimos treinta años han vivido una explosión científica en este último campo. Se han caracterizado muchos de los genes que realizan el diseño animal, genes que, sorprendentemente, son comunes a especies tan alejadas como la mosca o el ratón. La pregunta inmediata ante este insólito descubrimiento es saber cómo genes similares pueden realizar funciones tan distintas y explicar así la impresionante diversidad del reino animal.

La mayoría de estos genes han sido identificados en *Drosophila melanogaster*, la mosca del vinagre. Consecuentemente, y siendo además el organismo en el que trabajan los autores, una parte importante del libro está dedicada a este animal. Sin embargo, los descubrimientos en otros organismos, especialmente otros artrópodos y vertebrados, están igualmente bien explicados. La relación de temas que se desgranan en el libro es extensa: los genes y las rutas de señalización comunes a los organismos (el "juego de herramientas" del desarrollo), los campos morfogenéticos, los planes corporales y su variación en la evolución, la aparición de novedades evolutivas, etc. A su comprensión ayudan las decenas de ilustraciones, dibujos y esquemas que acompañan al texto.

Un lugar destacado se dedica a los genes homeóticos (o genes Hox) y su papel en el establecimiento de las diferencias morfológicas. Estos genes especifican el eje anteroposterior de la mayoría de los animales y, cuando mutan, causan la transformación de una parte del cuerpo en otra. Varios ejemplos en el libro ilustran la relación entre cambios en la expresión o función de alguno de estos genes y variaciones morfológicas. En el pasado siglo, tanto De Vries como Goldschmidt (éste, basándose precisamente en los fenotipos de mutaciones en genes homeóticos de *Drosophila*) propusieron que mutaciones en ciertos genes podrían producir cambios espectaculares en la forma ("monstruos con futuro" los llamó Goldschmidt) y ser así la base del origen de nuevas especies. Las alteraciones morfológicas, sin embargo, responden más bien a pequeñas modificaciones en secuencias reguladoras, que ajustan la distribución espacial y temporal de los genes que controlan el diseño animal. La regulación modular de los genes implicados en el desarrollo (Hox y otros) da lugar a una combinatoria que es, esta sí, la base del proceso evolutivo.

—Ernesto Sánchez-Herrero

tuación. Pero a lo largo de los años veinte comenzaron a acumularse excepciones y complicaciones. La teoría del gen se puso en cuestión desde varios frentes, en particular con los trabajos en torno a la variegación del maíz. Quizá, después de todo, el gen pudiera ser divisible, una estructura compuesta, lo mismo que el átomo. William Henry Eyster desarrolló la idea y le puso nombre: genómero o partes del gen. De acuerdo con su formulación, los genes comprendían agregados de unidades idénticas, cada una de las cuales contribuía a la expresión génica. Por ejemplo, el pericarpio del maíz ocurría en una serie graduada de alelos, que procedían del cereza hasta el blanco a través de matices de naranja y amarillos. Demerec se convirtió en uno de los principales defensores de la hipótesis del genómero.

En 1940, le planteó a Alfred Huettner y a otros la oportunidad de publicar un libro de referencia que resumiera cuanto se sabía sobre la genética y el desarrollo de *Drosophila melanogaster*. Aunque Demerec no escribió ningún capítulo fue el organizador de la obra y planificador de los experimentos necesarios para recabar los datos que faltaran. Demerec, al justificar su empeño, hecho realidad diez años más tarde, ofrece un cuadro valioso del estado de la cuestión en ese momento. Aunque *Drosophila melanogaster*, expone, constituye uno de los principales organismos utilizados en la investigación biológica a lo largo de las tres últimas décadas (prólogo de 1950), no se ha descrito todavía su desarrollo completo. No se ha llegado, prosigue, hasta los primordios de los órganos de la mosca; en muchos casos ni siquiera existe un conocimiento fragmentario de su plan de desarrollo.

Sin abandonar la genética de las moscas, durante la segunda guerra Demerec aprendió microbiología para

mejorar el rendimiento de la penicilina destinada al frente, lo que consiguió en varios órdenes de magnitud. Bajo su dirección los simposios de Cold Spring Harbor se dedicaron, durante los años cuarenta y cincuenta, a la genética vírica y bacteriana, tutelados por Max Delbrück, de la Universidad de Vanderbilt, y Salvador Luria, de la Universidad de Indiana. Formado en física teórica, Delbrück se sintió fascinado por la simplicidad del bacteriófago. Le parecía el átomo de hidrógeno de la biología, la partícula más simple capaz de replicación. No era de extrañar que aplicara un enfoque físico a la genética.

Pero lo que en el Laboratorio de Cold Spring Harbor era biología molecular de verano, en el Laboratorio del Centro de Investigaciones Médicas de Cambridge constituía foco de ocupación principal hasta convertirse en centro de referencia de esa disciplina entonces emergente (*Designs for Life. Molecular Biology after World War II*). Instituido por el Consejo de Investigaciones Médicas (MRC) en 1947, como unidad de dos personas dedicada al estudio cristalográfico de las proteínas, fue en lo que vino a llamarse Laboratorio de Biología Molelcular donde Crick y Watson, Kendrew y Perutz, Sanger y Brenner realizaron sus decisivas investigaciones. También en Cambridge predominaba el enfoque biofísico. En Gran Bretaña la biofísica comprendía tres grupos diferentes: el de radiación, que investigaba los efectos de la misma sobre el organismo; el grupo "nervio-músculo" que introdujo nuevos aparatos de registro desarrollados en el contexto de la investigación sobre el radar; y el grupo estructural, que utilizaba especialmente la difracción de rayos X, auxiliada por computadores electrónicos.



Reconstrucción del original de ADN que se conserva en el Museo de la Ciencia de Londres

Saraya de Chadarevian dedica la segunda parte de su obra al papel de la doble hélice en la configuración de la biología molecular. En 1953 no sólo Watson y Crick publican sobre la estructura del ADN; lo hacen también Rosalind Franklin y Raymond Gossling, Maurice Wilkins, W. E. Seeds, Alec Stokes y Herbert Wilson, y Bertil Jacobson. Pero pasarán todavía algunos años hasta que se tomara plena cuenta de su alcance real para el progreso de la biología molecular. Se da un primer paso crítico cuando, en 1958, Matthew Messelson y Franklin Stahl demuestran la replicación semiconservadora del ADN, y, un año después, Arthur Kornberg y sus colaboradores aíslan la enzima ADN polimerasa.

Como recuerda el propio Watson en otro lugar de este número de *Investigación y Ciencia*, Crick y él se basaron en los trabajos sobre difracción de rayos X de fibras de ADN para construir su modelo helicoidal. Su planteamiento no sólo produjo resultados correctos que han resistido el paso del tiempo, sino que abrieron el camino para otros análisis de la estructura de proteínas y ácidos nucleicos que se fueron sucediendo. Su hallazgo constituye uno de los hitos científicos del siglo XX, nadie lo duda. Cierto es que la función del ADN como agente principal de la herencia quedaba ya clara en 1953, pero el poner las cosas en un contexto tridimensional aportó una explicación sólida sobre su modo de operación. Queda trecho por recorrer. Así, aunque conocemos la estructura de la unidad básica fundamental de la cromatina, el nucleosoma, nos falta información sobre la estructura y función en niveles superiores de la organización de la cromatina.

LUIS ALONSO

Dennis E. Shasha

Carillón proteínico

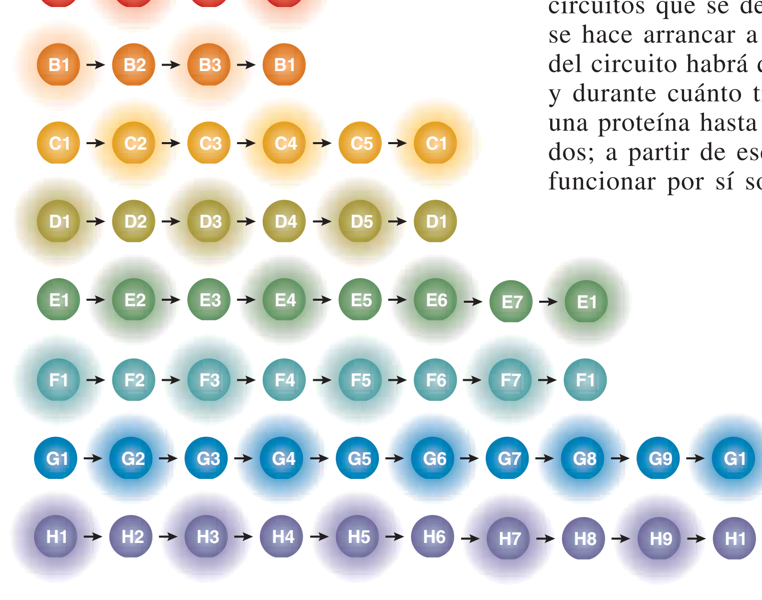
En los años cincuenta, Jacques Monod y François Jacob, del Instituto Pasteur de París, demostraron que ciertas proteínas reguladoras de la bacteria *Escherichia coli* tienen la facultad de inhibir la producción de otras proteínas. Utilizaremos la notación X → Y para indicar que la proteína X es inhibidora de la Y. Si X se activa, al cabo de un breve tiempo (un segundo, sea por caso), la proteína Y es inhibida. Si X no se activa, y tampoco se activa ningún otro inhibidor de Y, entonces Y se activará un segundo después de la inhibición de X.

Consideremos ahora tres proteínas, A, B y C, tales que A → B → C → A. Si A se activa, B se inhibe un segundo más tarde. Otro segundo después, C se activa, y al cabo de un segundo más, A vuelve a inhibirse. A partir de aquí el patrón se repite periódicamente: activación de B, inhibición de C, activación de A, inhibición de B, y así sucesivamente. Llamaremos a este sistema un circuito de proteínas: A, B, y C aparecen y desaparecen periódicamente, actuando como un reloj bioquímico. Tal reloj fue llevado a la práctica hace algunos años por Michael Elowitz, siendo alumno de posgrado en la Universidad de Princeton, y por su director, Stanislas Leibler.

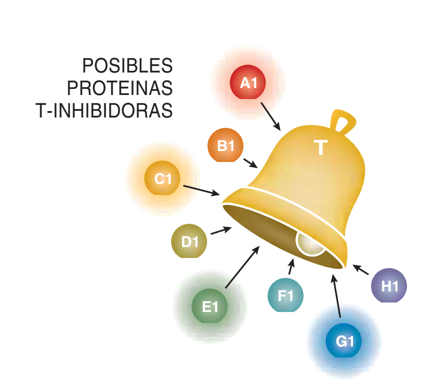
El problema de esta sección propone la creación de un "carillón proteínico" que suene cada 70 segundos. Hay ocho circuitos temporizadores, rotulados de A a H, que contienen tres, cinco, siete, o nueve proteínas. Ninguna de las proteínas de ninguno de los circuitos influye sobre las proteínas de los demás. Ahora bien, en cada circuito hay una proteína inhibidora de la proteína especial T, que cuando se activa emite una señal sonora. Si una cualquiera de estas ocho proteínas T-inhibidoras (que están rotuladas de A1 a H1) se activa, T quedará inhibida un segundo después. Y T no volverá a activarse hasta un segundo después de que todas las proteínas que la inhiben hayan quedado inhibidas.

Para poner en marcha alguno de los circuitos de este reloj es preciso forzar la producción de una de las proteínas del circuito. Por ejemplo, para arrancar el circuito C, podemos mantener C4 en estado activo durante 5 segundos. Un segundo después de comenzar la activación forzada, C5 queda inhibida. En los segundos sucesivos C1 es activada, C2, inhibida, y C3, activada. Pero C4 no queda inhibida al final de los cinco segundos, porque todavía se halla en activación forzada. C3 no impone la inhibición de C4 hasta un segundo después de cesar la activación forzada (es decir, al cabo de 6 segundos de iniciado el arranque). Ahora el ciclo prosigue ininterrumpidamente: en el séptimo segundo C5 se activa, y en el octavo, C1 se inhibe. C1 vuelve al estado activo en el segundo 13, torna a la inhibición en el 18, y así sucesivamente.

Para hacer que el carillón suene exactamente cada 70 segundos, sólo se necesitan cuatro de los ocho circuitos. (Los circuitos excluidos no tienen efecto sobre T.) El problema consiste en averiguar cuáles son los circuitos que se deben usar y de qué forma se hace arrancar a cada uno: ¿Qué proteína del circuito habrá que activar forzadamente, y durante cuánto tiempo? Es posible forzar una proteína hasta un máximo de 15 segundos; a partir de ese momento, el reloj debe funcionar por sí solo.



SARA CHEN



Solución del problema del mes pasado:

Si los consejeros son numerados desde A_0 hasta A_8, el director debería hacer "soplos" a 25 cuartetos determinados según el protocolo siguiente:

A_7, A_x, A_{x+1}, A_{x+3}
A_8, A_x, A_{x+2}, A_{x+3}
A_x, A_{x+1}, A_{x+2}, A_{x+4}
A_7, A_8, A_0, A_1
A_7, A_8, A_2, A_3
A_7, A_8, A_4, A_5
A_7, A_8, A_6, A_0

donde x recorre de 0 a 6 en cada una de las tres primeras líneas, y la operación + se hace módulo 7, de modo que $6 + 2 = 1$.

En cuanto un soplo ocasiona una fuga, el director determina cuáles son los tercetos del cuarteto que no pueden ser exonerados. Si hay más de un trío sospechoso, les hace confidencias a todos los tríos, menos a uno. Esta estrategia permitirá identificar a los indiscretos, bien directamente o por eliminación.

Solución en la Red

Se hallará una solución completa del problema del mes pasado, y la solución para el de este mes, visitando www.investigacionyciencia.es.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



MAGNETOESTRELLAS, por Chryssa Kouveliotou, Robert C. Duncan y Christopher Thompson

Hay estrellas cuyo grado de imantación es tal, que emiten gigantescos estallidos de energía magnética capaces de alterar la naturaleza del vacío cuántico.

NEUROBIOLOGIA DEL SUICIDIO, por Carol Ezzell

¿Por qué algunas personas deciden acabar con su vida? La investigación reciente busca una explicación en los mecanismos químicos que van asociados en el cerebro a esa opción.

INVENCION POR EVOLUCION, por John R. Koza, Martin A. Keane y Matthew J. Streeter

Programas de ordenador que funcionan por evolución darwinista están creando inventos nuevos y útiles. Merecen patentarse.

MALFORMACIONES EN ANFIBIOS, por Andrew R. Blaustein y Pieter T. J. Johnson

Tras ocho años de intenso estudio del alarmante aumento de malformaciones entre los anfibios, conocemos los tres principales factores implicados.

LA INGESTA DE ALCOHOL, por Arthur L. Klatsky

Beber vino con moderación es beneficioso para el sistema cardiovascular. El problema estriba en la adicción.

UN INSTRUMENTO MATEMATICO UNIVERSAL: LO INVARIANTE, por Anne Quéguiner-Mathieu

Merced a los invariantes, los matemáticos establecen parentescos entre objetos en un principio distintos. Por su ubicuidad constituyen poderosos instrumentos matemáticos de clasificación.

CATALISIS, por Avelino Corma y Hermenegildo García

Aceleran reacciones biológicas o seleccionan compuestos especulares, son grandes moléculas orgánicas o materiales porosos: el mundo de los catalizadores es muy variado.

CAOS EN LA ESCALA CUANTICA, por Mason A. Porter y Richard L. Liboff

Simulaciones de billares de escala atómica revelan fenómenos caóticos que permiten nuevos avances teóricos y aplicados, especialmente en nanotecnología.

